

Влияние магнитного поля, электрического поля и интенсивности освещения на параметры рекомбинационных волн в кремнии

Н. Ф. Зикриллаев^а, М. М. Шоабдурахимова^а, У. Х. Курбанова^а,
Н. Наркулов^б, Ф. К. Шакаров^а

^аТашкентский государственный технический университет,
Ташкент, 100095, Узбекистан, *e-mail: shoabduraximova.m@gmail.com
^бНациональный университет Узбекистана, Ташкент, 100174, Узбекистан

Поступила в редакцию 10.07.2023

После доработки 11.01.2024

Принята к публикации 17.01.2024

Приводятся результаты экспериментальных исследований автоколебаний тока типа рекомбинационных волн (РВ) в кремнии, легированном примесными атомами селена. Определены зависимости параметров РВ (амплитуда и частота) в образцах Si<Se> от удельного сопротивления и концентрации образованных нанокластеров атомов селена, а также от влияния магнитного поля, которые дают возможность управлять амплитудой в интервале $J = 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$ А и частоте автоколебаний $f = 10^4 - 5 \times 10^6$ Гц. Показана возможность использования автоколебаний тока, наблюдаемых в кремнии, диффузионно-легированном примесными атомами селена, для создания твердотельных генераторов.

Ключевые слова: кремний, селен, диффузия, рекомбинационные волны, автоколебания, амплитуда, частота, магнитное поле, освещение

УДК 621.315.592

<https://doi.org/10.52577/eom.2024.60.1.106>

ВВЕДЕНИЕ

Автоколебания тока различной природы наблюдались во многих полупроводниковых материалах и структурах [1–5]. Анализ результатов этих работ показывает, что автоколебания тока типа температурно-электрических неустойчивостей (ТЭН) наблюдаются при достаточно высоких электрических полях ($E > 300$ В/см), относительно низких температурах (77–140 К), а также только при определенных значениях интенсивности монохроматического или интегрального света [6, 7]. Все эти особенности существенно затрудняют использование этого явления при создании новых электронных приборов с амплитудно-частотным выходом. Поэтому возбуждение автоколебаний тока с управляемыми параметрами при комнатной температуре и низких электрических полях является одной из актуальных задач современной электроники.

Из анализа литературных данных установлено, что рекомбинационные волны (РВ) наблюдаются в различных полупроводниковых материалах, механизм которых связан с концентрационными или концентрационно-полевыми неустойчивостями [8, 9]. Как известно, при различных внешних воздействиях в полупроводниковых материалах происходит перераспреде-

ление концентрации свободных носителей тока. Такое изменение приводит к перераспределению электронов между зоной проводимости и глубоким энергетическим уровнем, создаваемым примесными атомами в запрещенной зоне. При термодинамическом равновесии скорости генерации и рекомбинации носителей тока в полупроводнике будут равны. При воздействии электрического поля это равновесие может быть нарушено как в сторону преобладания генерации над рекомбинацией, так и в обратную сторону. Из-за этого в полупроводнике возникают токовые неустойчивости или так называемые рекомбинационные волны.

Впервые в работе [10] О.В. Константинов, В.И. Перель и Г.В. Царенков теоретически обосновали возможности возбуждения РВ, которые являются квазинейтральными колебаниями концентрации электронов и дырок в полупроводниках в запрещенной зоне с глубокими энергетическими уровнями примесных атомов с сильно различающимися сечениями захвата электронов и дырок ($S_n \gg S_p$ или $S_n \ll S_p$). Установлено, что РВ возникают при отсутствии разогрева образца в положительном участке вольт-амперной характеристики (ВАХ) и распространяются в полупроводниковом материале в виде продольных электрических волн.

РВ в полупроводниковых материалах как теоретически, так и экспериментально достаточно хорошо изучены в работе [11]. Авторами было показано, в каких полупроводниках, с какой примесью и при каких условиях возбуждаются РВ. Ими предложены самые идеальные условия наблюдения РВ в кристаллах германия, которыми являются примесные атомы марганца, а в кремнии – примесные атомы золота. Энергетические уровни легирующих примесей должны находиться приблизительно в середине запрещенной зоны полупроводникового материала.

С.Г. Калашников и И.В. Карпова впервые в образцах германия, легированного примесными атомами марганца, наблюдали неустойчивости тока, связанные с возбуждением быстрых РВ [12]. Колебания тока выявлялись в кристаллах германия *n*-типа, в которых центрами рекомбинации были примесные атомы марганца, или в германии *p*-типа – с примесными атомами меди. Однако наиболее важные результаты были получены в образцах германия, легированного примесными атомами сурьмы и компенсированного примесными атомами марганца для того, чтобы верхний уровень марганца с энергией $E_c - 0,37$ эВ был заполнен лишь частично. Колебания тока наблюдались при температурах, близких к комнатной, и напряженности электрического поля в несколько десятков В/см. Колебания тока наблюдались только в относительно узком интервале температур [12]. При этом период колебаний непрерывно уменьшался от 20 до 2 мкс ($f = 5 \times 10^4 - 5 \times 10^5$ Гц) с повышением температуры окружающей среды. Амплитуда колебаний была не велика, а глубина модуляции $[(I_{\max} - I_{\min}) / I_{\max}]$ составляла 20–30%.

Б.В. Корнилов и Ю.И. Завадский подробно исследовали РВ в образцах кремния, легированного примесными атомами цинка [13], ими была установлена температурная область существования автоколебания тока $T = 250 - 350$ К. При этом изменения параметров автоколебаний составляли для частоты $f = 1 - 10^4$ Гц и для амплитуды $I = 10^{-5} - 10^{-4}$ А с глубиной модуляции 0,1–7%. Также авторами была показана возможность их применения в качестве твердотельных генераторов.

Многими авторами в различных материалах также были обнаружены колебания тока, которые связывали с возбуждением РВ [14, 15]. В этих работах исследовались колебания тока в кристаллах германия, компенсированных примесными атомами никеля [14] и золота [15], связанных с возбуждением медленных РВ.

Авторами в работе [15] было показано, что в кристаллах германия, компенсированных примесными атомами золота, управляя концентрацией примесных атомов марганца, можно создавать условия возбуждения РВ.

Влияние магнитного поля на параметры рекомбинационных волн в компенсированных полупроводниках и полупроводниковых соединениях исследовалось в работах [16, 17]. Авторами этих работ было показано, что влияние поперечного магнитного поля приводит к изменению величины порогового поля, в котором возбуждаются РВ в образцах Ge<Mn>. В работе [18] исследовалось влияние поперечного магнитного поля на условия возбуждения медленных рекомбинационных волн в образцах кремния, легированного примесными атомами цинка. В этой работе было показано, что влияние продольного магнитного поля не приводит к существенному изменению условий возбуждения и параметров автоколебаний тока. Из анализа литературных данных установлено, что воздействие магнитного поля как продольного, так и поперечного направления относительно направления тока существенно влияет на условия возбуждения и параметры автоколебаний тока типа температурно-электрической неустойчивости (ТЭН), обнаруженной относительно низких температур в кремнии, легированном примесными атомами марганца, цинка, серы или селена [19, 20]. Поэтому влияние магнитного поля на пороговую напряженность электрического поля и параметры автоколебаний тока типа РВ в кремнии вызывает большой интерес, так как эти виды автоколебаний тока возбуждаются при комнатной температуре.

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИЯ

Воздействие магнитного поля на параметры РВ исследовалось при слабых магнитных полях, в которых выполняется условие:

$$\frac{\mu H}{c} \ll 1,$$

где μ – подвижность основных носителей тока; c – скорость света; H – напряженность магнитного поля.

Результаты исследований показали, что магнитное поле как поперечного, так и продольного направления почти одинаково влияет на условия возбуждения и параметры рекомбинационных волн. При этом установлено, что на условия возбуждения и параметры автоколебаний тока сильнее влияет поперечное направление магнитного поля относительно направления тока.

Для исследования использовался кремний, легированный примесными атомами селена. Выбор примесного атома обусловлен тем, что атомы селена в кремнии, в отличие от многих других примесей, имеют достаточно большую растворимость и концентрацию электроактивных атомов в кремнии, которая может достигать до $N = 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Из анализа литературных данных установлено, что примесные атомы селена в решетке кремния могут образовывать нанокластеры, состоящие из нескольких молекул селена, таких как Se_2 и Se_4 [21]. Нужно учесть, что атомы селена в кремнии являются донорными примесями и находятся между узлами кристаллической решетки в следующих состояниях Se^0 , Se^+ , Se^{++} , что приводит к образованию положительных многозарядных кластеров в кремнии.

В качестве исходного материала был использован монокристаллический кремний p -типа с удельным сопротивлением $\rho = 1 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ (марки КДБ-1), с концентрацией остаточного кислорода $N_0 = 5-7 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$. Диффузия селена проводилась из газовой фазы по новой разработанной низкотемпературной поэтапной диффузионной технологии, были получены образцы $\text{Si} \langle \text{Se} \rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 10^2-10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$, n - и p -типами проводимости. Экспериментальные результаты показали, что при легировании кремния атомами селена по стандартной технологии [21, 22] не только происходит очень сильная эрозия поверхности материала, но и не удается получить образцы, однородно легированные с определенными концентрациями атомов селена в кремнии. Разработана низкотемпературная и поэтапная диффузионная технология легирования кремния атомами селена, позволяющая получить образцы $\text{Si} \langle \text{Se} \rangle$ с различными удельными сопротивлениями и типами проводимости [23–25]. Легирование кремния осуществлялось в интервале температур $T = 30-1250 \text{ }^\circ\text{C}$ при определенной скорости нагрева и выдержке при температуре $T = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение $t = 30$ мин. Кроме того, во время диффузии контролировалось давление паров диффузанта селена в кварцевой ампуле, как в работе [26]. Такая технология легирования позволила полностью исключить эрозию поверхности и обеспечить получение кремния, однородно легированного атомами селена, и образование нанокластеров, состоящих из молекул Se_2 или Se_4 , в решетке кремния [27, 28].

Автоколебания тока исследовались на стандартных установках [29] при комнатных температурах. Результаты исследования показали, что в перекомпенсированных образцах

кремния ($n\text{-Si} \langle \text{Se} \rangle$), полученных как по низкотемпературной поэтапной, так по обычной высокотемпературной диффузионной технологии, независимо от удельного сопротивления материала, рекомбинационные волны не наблюдались.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследования влияния магнитного поля на условия возбуждения (порогового поля) и на параметры (амплитуда, частота) РВ в кремнии, легированном примесными атомами селена $p\text{-Si} \langle \text{Se} \rangle$, показали, что магнитное поле приводит к существенному изменению этих величин. Как видно из рис. 1, с ростом величины магнитного поля, независимо от его направления, величина порогового поля, при котором возбуждаются автоколебания E_n , возрастает, а пороговая частота f_n сначала увеличивается до определенного критического значения, а в дальнейшем с ростом величины магнитного поля наблюдается уменьшение.

В исследованном интервале величины напряженности поперечного магнитного поля $H = 0-25 \text{ кЭр}$ пороговая величина напряженности электрического поля, при которой возбуждаются РВ, увеличивалась более чем на 100% в образцах кремния p -типа проводимости, легированного примесными атомами селена ($\text{Si} \langle \text{Se} \rangle$). Установлено, что пороговая частота сначала увеличивается до некоторой величины, а потом уменьшается, при этом максимальное изменение составляет порядка $\sim 20\%$ относительно начального. При воздействии магнитного поля продольного направления относительно направления тока ($H \parallel I$) уменьшение пороговой частоты происходит медленно, а характер зависимости при этом остается таким же, как и при поперечном направлении магнитного поля, то есть, независимо от направления магнитного поля относительно направления тока, наблюдается изменение пороговой напряженности электрического поля и пороговой частоты рекомбинационных волн.

Для исследования влияния магнитного поля на параметры РВ сначала в образцах $p\text{-Si} \langle \text{Se} \rangle$ возбуждались регулярные автоколебания тока путем увеличения напряженности электрического поля до величины больше, чем пороговое $E > E_n$. Как видно из рис. 2, при увеличении величины поперечного магнитного поля значение амплитуды автоколебаний тока уменьшается, а частота растет. При этом следует отметить, что каждому значению приложенной напряженности электрического поля соответствует такое критическое значение магнитного поля ($H_{кр}$), при котором возбуждаются автоколебания. Установлено, что напряженность прило-

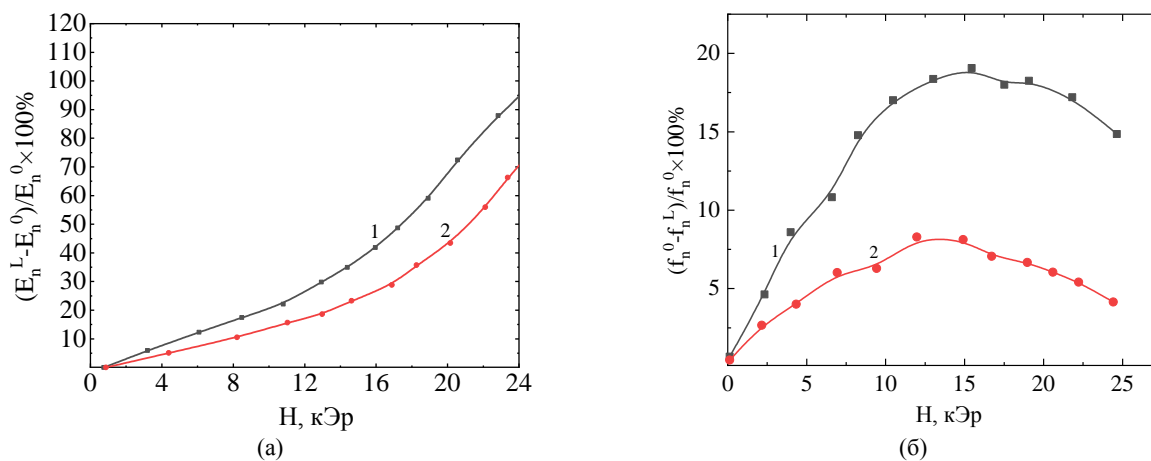


Рис. 1. Зависимость порогового поля (а) и частоты (б) РВ от величины магнитного поля при $T = 300$ К: 1 – поперечное; 2 – продольное направления магнитного поля относительно тока $E_n^0 = 55$ В/см; $f_n^0 = 3,25$ кГц для образцов p -Si<Se> с $\rho = 5 \times 10^3$ Ом \times см.

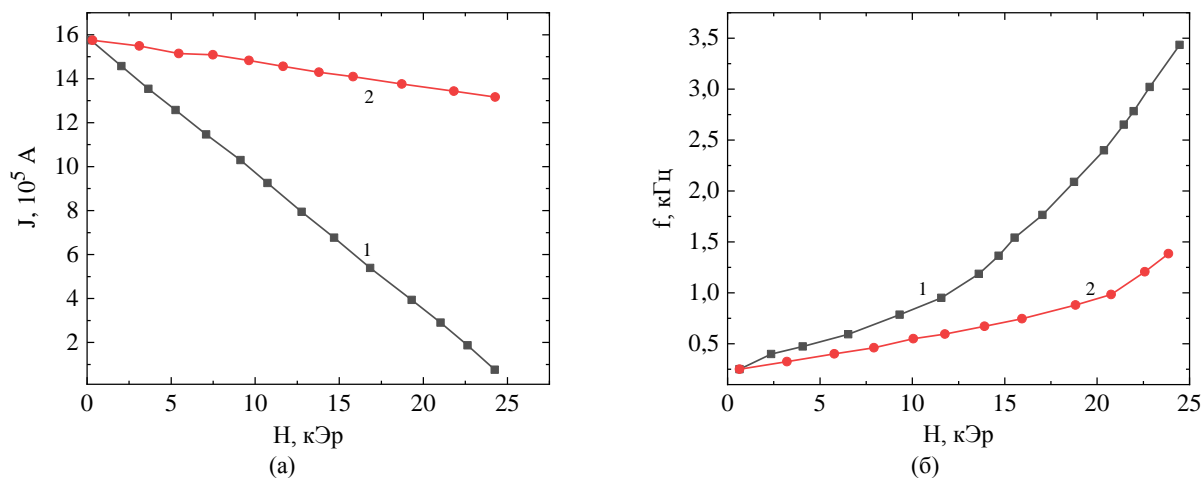


Рис. 2. Зависимость амплитуды (а) и частоты (б) РВ от значения магнитного поля для образца p -Si<Se> с $\rho = 5 \times 10^3$ Ом \times см при $E = 100$ В/см, $T = 300$ К: 1 – поперечное; 2 – продольное направления магнитного поля.

женного электрического тока ($E_{кр}$), при котором возбуждаются автоколебания, смещается к более высоким значениям в зависимости от роста величины магнитного поля. В данном случае (рис. 2) при величине $H_{кр} = 24$ кЭр регулярные автоколебания тока переходят в шум и происходит срыв, то есть наблюдается магнитное гашение автоколебаний тока. В диапазоне изменения величины магнитного поля $H = 0$ –24 кЭр амплитуда автоколебаний тока уменьшается более чем в 15 раз, а частота увеличивается более чем в 1,6 раза. Воздействие продольного магнитного поля также приводит к изменению этих параметров, однако в этом случае изменение как частоты, так и амплитуды относительно меньше, чем при поперечном направлении магнитного поля.

Из анализа результатов исследования установлено, что условия возбуждения и параметры РВ сильно зависят от влияния магнитного поля. Так, параметры автоколебаний существенно зависят от приложенного электрического поля и интенсивности освещения, что и позволяет получить автоколебания с заданными параметрами при воздействии этих величин.

На рис. 3 представлена зависимость частоты автоколебания тока (f) от приложенной напряженности электрического поля для образцов с различным удельным сопротивлением при $T = 300$ К. Как видно из рис. 3, зависимость частоты автоколебания от напряженности электрического поля $f(E)$ состоит из явно выраженных двух участков, независимо от удельного сопротивления образцов кремния, легированного примесными атомами селена.

На первом участке частота РВ слабо меняется от приложенного электрического поля, а при значениях приложенного напряжения $E > E_{кр}$ начинается второй участок, где частота автоколебания существенно увеличивается с ростом напряженности электрического поля. Следует отметить, что с ростом удельного сопротивления образцов Si<Se> величина порогового поля (E_n), при котором возбуждаются автоколебания, смещается в сторону больших величин, при этом также наблюдается существенный рост частоты. Эти результаты показывают, что для образцов Si<Se> с заданным удельным сопротивлением существует определенная величина напряженности

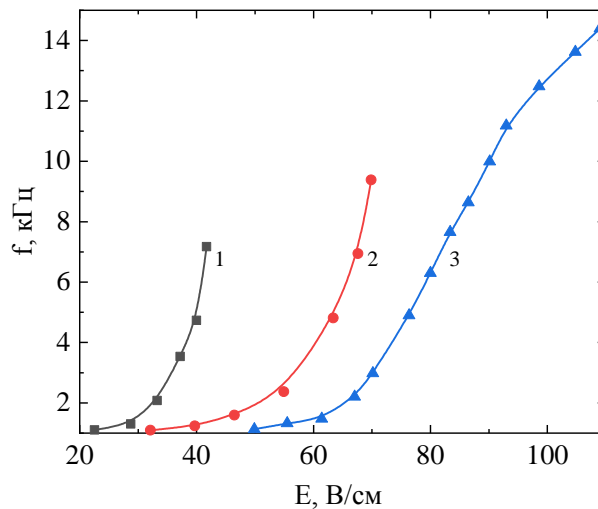


Рис. 3. Зависимость частоты автоколебания тока от электрического поля в образцах p -Si<Se> с различным удельным сопротивлением: 1 – $\rho = 3,5 \times 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; 2 – $\rho = 1,8 \times 10^3 \text{ Ом} \cdot \text{см}$; 3 – $\rho = 4 \times 10^4 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при $T = 300 \text{ К}$.

электрического поля, при которой возбуждаются автоколебания тока. Установлено, что с ростом удельного сопротивления образцов Si<Se> существенно расширяется область существования автоколебания тока по электрическому полю, а также существенно увеличивается частота автоколебания $f = 500\text{--}2 \times 10^4 \text{ Гц}$. Частота автоколебания тока меняется в широком интервале $f = 500\text{--}2 \times 10^4 \text{ Гц}$ в зависимости от удельного сопротивления образцов кремния, легированного примесными атомами селена, от $\rho = 3,5 \times 10^2 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ до $\rho = 10^5 \text{ Ом} \cdot \text{см}$ при температуре $T = 300 \text{ К}$. Результаты исследования показывают, что, управляя удельным сопротивлением образцов Si<Se>, можно изменить частоту автоколебания в достаточно широком диапазоне.

Интересные результаты были получены при исследовании влияния интегрального освещения на параметры автоколебаний тока, наблюдаемых в образцах кремния, легированного примесными атомами селена (рис. 4 и 5).

Исследования зависимости амплитуды автоколебания от величины напряженности электрического поля и освещенности (рис. 5) можно разделить на два участка. На первом участке амплитуда автоколебания тока практически линейно увеличивается с ростом электрического поля и достигает своего максимального значения при $E = E_{\text{max}}$. На втором участке, где $E > E_{\text{max}}$, амплитуда автоколебания линейно уменьшается до значения $E_{\text{ср}}$, при котором наблюдается срыв автоколебания. Установлено, что с ростом интенсивности интегрального освещения значения $E_{\text{ср}}$ и E_{max} смещаются в сторону низких напряженностей электрических полей.

Из анализа результатов исследования влияния интенсивности интегрального освещения на параметры автоколебания тока в кремнии, легированном примесными атомами селена, установлено следующее:

1) увлечение интенсивности интегрального освещения до $J = 200$ люкс приводит к экспоненциальному росту частоты РВ в 12–15 раз;

2) с ростом интенсивности интегрального освещения протяженность первого участка, где частота слабо зависит от E , сужается, а значения $E_{\text{п}}$ – порогового поля, при которых возбуждаются РВ, смещаются в сторону низких напряженностей электрических полей;

3) с ростом интенсивности интегрального освещения значения ($E_{\text{ср}}$), при которых срываются автоколебания тока, смещаются в сторону низких электрических полей, а при достаточно высоких интенсивностях света $I > 200$ люкс происходит срыв автоколебаний тока.

ОБСУЖДЕНИЕ

Из анализа литературных данных установлено, что для наблюдения рекомбинационных волн необходимо выполнение условия

$$\alpha = \frac{p\tau_n}{n\tau_p} > 1, \quad (\text{где } p \text{ и } n - \text{равновесная}$$

концентрация дырок и электронов соответственно, τ_n и τ_p – время жизни электронов и дырок), которое является одним из основных требований для существования автоколебаний тока [10, 11].

Механизм РВ, наблюдаемый в кремнии, легированном примесными атомами селена, можно объяснить следующим образом. Экспериментальные результаты исследования показали, что примесные атомы селена в кремнии образуют нанокластеры, состоящие из двух или четырех атомов. Заряд кластеров, состоящий из четырех атомов селена, может достигать до $z = +8$ и является сильно отталкивающим центром для дырок и притягивающим для электронов в образцах Si<Se> p -типа проводимости. Поэтому образованные флуктуации дырок отталкиваются от положительно заряженных кластеров, состоящих

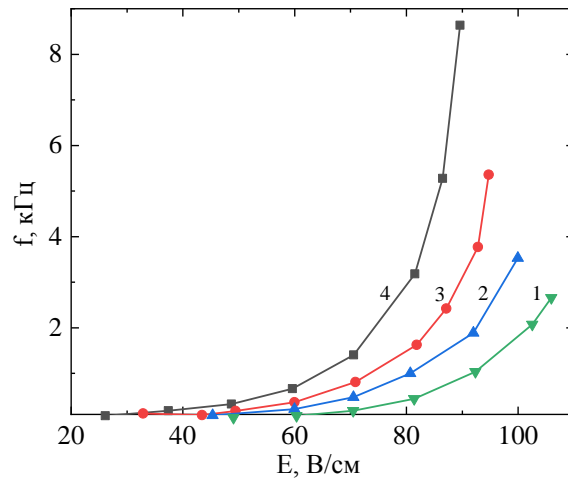


Рис. 4. Зависимости частоты РВ от приложенного электрического поля для образца $p\text{-Si}\langle\text{Se}\rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 1,8 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, $T = 300 \text{ К}$: 1 – в темноте, при освещении интегральным светом: 2 – $I = 20$ люкс; 3 – $I = 100$ люкс; 4 – $I = 200$ люкс.

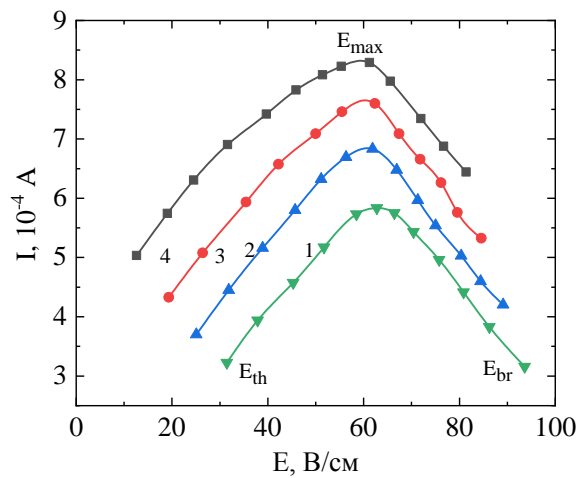


Рис. 5. Зависимость амплитуды автоколебания тока от приложенного напряжения электрического поля в образцах $p\text{-Si}\langle\text{Se}\rangle$ с удельным сопротивлением $\rho = 1,8 \times 10^3 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ при $T = 300 \text{ К}$: 1 – в темноте, при освещении интегральным светом: 2 – $I = 20$ люкс; 3 – $I = 100$ люкс; 4 – $I = 200$ люкс.

Таблица. Параметры твердотельного генератора на основе кремния

Материал	Удельное сопротивление, Ом см	Пороговое поле возбуждения, В/см	Освещение интегральным светом, люкс	Частота, Гц	Амплитуда, мА	Температурная область, К
$\text{Si}\langle\text{Se}\rangle$ p -типа проводимости	$3,5 \times 10^2 - 10^5$	30–50	10–200	$5 \times 10^2 - 2 \times 10^4$	$10^{-5} - 1,6 \times 10^{-4}$	250–350

из атомов селена. Приложенное электрическое поле приводит к дрейфовому смещению образованных флуктуаций до отрицательного контакта и при этом в цепи наблюдаются всплески тока. В объеме образцов кремния, диффузионно-легированного примесными атомами селена, число флуктуаций дырок достаточно большое. Флуктуации дырок, движущиеся к отрицательной полярности контакта, приводят к периодическому возбуждению автоколебаний тока.

Зависимость порогового поля и пороговой частоты от величины напряженности магнитного поля можно объяснить отклонением носителей заряда (дырок) на отрицательную полярность постоянного магнитного поля. Магнитное поле

приводит к образованию дополнительного магнитного сопротивления, которое приводит к изменению Холловской подвижности и отклонение дырок к отрицательной полярности магнитного поля.

Освещения интегральным светом образцов кремния, легированного примесными атомами селена, приводит к появлению дополнительных неравновесных концентраций электронов и дырок. Свободные электроны захватываются в положительно заряженных кластерах, которые состоят из двухкратно положительно заряженных ионов селена. Дырки участвуют в образовании флуктуаций, которые приводят к росту амплитуды и уменьшению времени между

двумя флуктуациями, доходящими до контакта, то есть увеличивается частота РВ.

В отличие от физического механизма образования РВ в полупроводниках, где необходимо формирование глубоких энергетических уровней, в образцах кремния, легированного примесными атомами селена, образуются многократно положительно заряженные нанокластеры, состоящие из ионов селена Se^{++} . В этом случае образованные нанокластеры приводят к выполнению требований РВ, в которых сечения захвата носителей тока (электронов и дырок) должны отличаться друг от друга во много раз. В нашем случае выполняется условие $S_n \gg S_p$ в кремнии, легированном примесными атомами селена.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные экспериментальные результаты показывают, что автоколебания тока типа РВ в кремнии $p-Si<Se>$, в отличие от обнаруженных в других полупроводниковых материалах, возбуждаются при комнатной температуре и имеют довольно низкое значение E_n . Автоколебания существуют в достаточно широкой области удельного сопротивления образцов от $\rho = 3,5 \times 10^2 - 8 \times 10^4$ Ом \times см как в темноте, так и при освещении интегральном светом. Эти результаты исследования показывают возможности управлять частотой и амплитудой автоколебаний тока с помощью электрического поля и интенсивности интегрального освещения. На основе полученных результатов исследований рекомбинационных волн в кремнии, легированном примесными атомами селена, можно создать твердотельные генераторы и датчики физических величин с амплитудно-частотным выходом. Параметры предлагаемого твердотельного генератора на основе кремния, легированного примесными атомами селена, показаны в [таблице](#).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность доктору физико-математических наук профессору кафедры «Цифровая электроника и микроэлектроника» К.С. Аюпову за ценные советы при обсуждении полученных результатов.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них отсутствует конфликт интересов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Oshio, Ken-ichi, Bifurcation and chaos of current oscillations in semiconductors with NDC, *J. Phys. Soc. Jap.*, 1998, vol. 67, no. 7, p. 2538.

2. Bakhadir Khanov, M.K., Zikrillayev, N.F., Ayupov, K.S., Kadirova, F.A., et al., Spectral range of current self-oscillation in manganese doped silicon, *Techn. Phys.*, 2006, vol. 51, no. 9, p. 1235.
3. Зикриллаев, Н.Ф., Шоабдурахимова, М.М., Аюпов, К.С., Уракова, Ф.Э., Ньматов О.С., Автоколебательные процессы в кремнии, проблемы и перспективы исследования и применение их в электронике, *Электронная обработка материалов*, 2023, т. 59, в.5, с. 56–71.
4. Колобаев, В.В., Возникновение генерационно-рекомбинационной неустойчивости в тонкопленочных структурах, *ФТП*, 1999, т. 33, в. 4, с. 423.
5. Акимов, Б.А., Богоявленский, В.А., Рябова, Л.И., Васильков, В.Н., и др., Термостимулированные токи и неустойчивости фотоотклика в сплавах на основе PbTe(In) при низких температурах, *ФТП*, 1999, т. 33, № 1, с. 9.
6. Бахадырханов, М.К., Зикриллаев, Н.Ф., Низкочастотные колебания тока с большой амплитудой в компенсированном марганцем кремнии, *ФТП*, 1984, т. 18, в. 12, с. 2220.
7. Голик, Л.Л., Паксеев, В.Е., Балкерей, Ю.И., Елинсон, М.И., и др., Автоколебательные режимы в кристаллах сульфида кадмия при наличии температурной-электрической неустойчивости, *ФТП*, 1984, т. 18, в. 8, с. 502.
8. Karpova, I.V., Kalashnikov, S.G., Konstantinov, O.V., Perel, V.I., et al., Current instability in germanium due to excitation of the recombination waves, *Phys. stat. sol.*, 1969, vol. 33, no. 2, p. 863.
9. Карпова, И.В., *Процессы рекомбинации и рекомбинационные волны в биполярной плазме полупроводника с глубокими центрами*. Дисс. ...докт. физ.-мат. наук, Москва, 1982. 303 с.
10. Константинов, О.В., Перель, В.И., Царенков, Г.В., Условия существования медленных и быстрых рекомбинационных волн в полупроводниках, *ФТП*, 1967, т. 9, в. 6, с. 1761.
11. Сабликов, В.А., Условия возбуждения рекомбинационных волн в ограниченных полупроводниках, *ФТП*, 1982, т. 16, в. 10, с. 1759.
12. Карпова, И.В., Калашников, С.Г., Колебания тока в германии n-типа с примесью марганца, *ФТП*, 1968, т. 2, в. 5, с. 954.
13. Завадский, Ю.И., Корнилов, Б.В., Рекомбинационные волны в кремнии, легированном цинком, *ФТП*, 1969, т. 11, в. 6, с. 1194.
14. Богун, П.П., Корнилов, Б.В., Рекомбинационные волны в германии с никелем, *ФТП*, 1976, т. 10, в. 4, с. 765.
15. Карпова, И.В., Сыровегин, С.М., Рекомбинационные волны в германии с золотом, *ФТП*, 1976, т. 16, в. 9, с. 1601.
16. Карпова, И.В., Калашников, С.Г., Константинов, О.В., Перель, В.И., Рекомбинационные волны в магнитном поле: 1. Проводимость в

- скрещенных электрическом и магнитном полях, *ФТП*, 1972, т. 16, в. 11, с. 2189.
17. Карпова, И.В., Калашников, С.Г., Константинов, О.В., Перель, В.И., Рекомбинационные волны в магнитном поле: 1. Зависимость критического электрического поля неустойчивости от магнитного поля, *ФТП*, 1973, т. 7, в. 1, с. 72.
 18. Завадский, Ю.И., Корнилов, Б.В., Рекомбинационные волны в кремнии, легированном цинком, *ФТП*, 1969, т. 11, в. 6, с. 1194.
 19. Бахадырханов, М.К., Аскарлов, Ш.И., Зикриллаев Н.Ф., Влияние магнитного поля на температурно-электрическую неустойчивость в кремнии, легированном марганцем, *ФТП*, 1986, т. 20, в. 3, с. 423.
 20. Шик, А.Я., Дахно, А.Н., Емельяненко, О.В., Лагунова, Т.С., Магнитосопротивление в неоднородных кристаллах n-InP, *ФТП*, 1980, т. 14, в. 6, с. 1110.
 21. Таскин, А.А., Тишковский, Е.Г., Образование квазимолекул Se_2 в кремнии, легированном селеном, *ФТП*, 1998, т. 32, № 11, с. 1306.
 22. Бахадырханов, М.К., Болтакс, Б.И., Куликов Г.С., Диффузия, электроперенос и растворимость примеси марганца в кремнии, *ФТТ*, 1972, т. 14, в. 6, с. 1671.
 23. Болтакс, Б.И., *Диффузия и точечные дефекты в полупроводниках*. Ленинград: Наука, 1972. 384 с.
 24. Bakhadirkhanov, M.K., Askarov, Sh.I. and Norkulov, N., Some features of chemical interaction between a fast diffusing impurity and a group VI element in silicon, *Phys. stat. sol.(a)*, 1994, vol. 142, p. 339.
 25. Зикриллаев, Н.Ф., Шоабдурахимова, М.М., Аюпов, К.С., Исамов, С.Б., и др., Управление электроактивными концентрациями примесных атомов в кремнии, *Приборы*, 2022, № 8 (266), с. 45.
 26. Бахадырханов, М.К., Зикриллаев, Н.Ф., Арзикулов, Э.У., Влияние упругости паров диффузанта на концентрацию электроактивных атомов и степень компенсации образцов Si<Zn>, *Письма ЖТФ*, 1991, т. 17, в. 12, с. 1.
 27. Зикриллаев, Н.Ф., Турсунов, О.Б., Кушиев, Г.А., Разработка и создание нового класса варизонных структур на основе кремния с участием атомов Zn и Se, *ЭОМ*, 2023, т. 59, № 2, с. 16.
 28. Зикриллаев, Н.Ф., Турсунов, О.В., Формирование в легированном кремнии $(Si_2)_{1-x}(ZnSe)_x$ ($0 \leq x \leq 0,01$) и исследование их структурных и фотоэлектрических свойств, *Science and world*, 2022, vol. 101, № 1, p. 8.
 29. Бахадирханов, М.К., Абдураимов, А., Хамидов, А., Илиев, Х.М. и др., Универсальная установка для исследования тензосвойств полупроводниковых материалов. *Приборы и техника эксперимента*, 1988, в. 4, с. 174.

Summary

The paper presents the results of experimental studies of self-oscillations of the current of the recombination wave (RW) type in silicon doped with impurity selenium atoms. Doping of silicon with impurity selenium atoms was carried out using a new developed technology, which allows the formation of nanoclusters of impurity selenium atoms in the silicon lattice consisting of Se_2 and Se_4 molecules, without erosion of the surface of the samples. Self-oscillations in the Si<Se> samples were detected at room temperature and at sufficiently low electric fields. The dependences of the RW parameters (amplitude and frequency) in the Si<Se> samples on the resistivity and concentration of the formed nanoclusters of selenium atoms, as well as on the influence of a magnetic field, which makes it possible to control the amplitude in the range of $J = 10^{-5} - 5 \times 10^{-3}$ A and the frequency of self-oscillations of $f = 10^4 - 5 \times 10^6$ Hz. The mechanism of the observed RWs is explained by the formation of nanoclusters consisting of two (Se_2) or four (Se_4) selenium atoms in silicon, which leads to the formation of fluctuations (clusters) of the main charge carriers and their reaching contact when determining the magnitude of the applied constant electric field. A possibility of practical use of self-oscillations of current observed in silicon diffusion doped with selenium impurity atoms to create solid-state generators is shown.

Keywords: silicon, selenium, diffusion, recombination waves, self-oscillations, amplitude, frequency, magnetic field, lighting