

КОЛЕБАНИЯ ФОТОТОКА В КРЕМНИИ С КВАНТОВЫМИ ТОЧКАМИ, ВЫЗВАННЫЕ ИНФРАКРАСНЫМ СВЕТОМ

*Самаркандский государственный университет им. А. Навои,
Университетский бульвар, 15, г. Самарканд, 140104, Республика Узбекистан,
eshkuvat@samdu.uz*

Введение

В работе [1] была исследована температурно-электрическая неустойчивость (ТЭН), обнаруженная в ионно-имплантированных марганцем образцах кремния Si<Mn>. ТЭН в этих образцах Si<Mn> наблюдалась при освещении их интегральным светом и при напряженностях электрических полей в интервале от 500 до 5000 В/см.

Настоящая работа посвящена исследованию неустойчивостей тока, обнаруженных в ионно-имплантированных образцах Si<Mn>, при освещении их инфракрасным (ИК) светом из области собственного поглощения и при воздействии слабого электрического поля. Устойчивая генерация колебания наблюдалась при температурах меньше чем 130 К. Образцы для экспериментальных измерений изготавливались по технологии, описанной в [1].

Экспериментальная установка и результаты экспериментов

Для исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) и параметров автоколебаний нами была собрана экспериментальная установка, состоящая из последовательно соединенных образцов $R_{обр}$, находящихся в специальном металлическом криостате, нагрузочного сопротивления $R_{наг}$ и источника постоянного тока. Независимо от условий эксперимента всегда выполнялся режим генератора напряжения, то есть $R_{обр} > R_{наг}$. В качестве источника ИК-излучения использовался глобар спектрометра ИКС-29. При этом криостат закреплялся на выходной щели спектрометра. Интенсивность ИК-излучения управлялась с помощью калиброванных металлических сеток, которые механически опускались между окошком криостата и выходной щелью спектрометра. Изменение температуры криостата и стабилизация осуществлялись с помощью электронного стабилизатора, позволяющего управлять током транзистора, закрепленного на подложке криостата, что обеспечивало стабилизацию температуры подложки ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Температура подложки и образца измерялась медь-константановой термопарой.

При исследовании ВАХ ионно-имплантированных образцов Si<Mn> n типа с $\rho = 9,1 \cdot 10^4$ Ом·см, освещенных ИК светом из области собственного поглощения, были обнаружены периодические колебания фототока инфранизкой частоты. На рис. 1 показана ВАХ этого образца. Как видно из рисунка, фототок I_{ϕ} при малых напряжениях (до 1 В) возрастает суперлинейно, затем рост I_{ϕ} замедляется и до 30 В зависимость $I_{\phi} = f(U)$ сублинейная, затем при $U > 30$ В эта зависимость линейная. В области сублинейного участка ВАХ возбуждались низкочастотные колебания фототока. При этом образец находился в специальном криостате, охлажденный жидким азотом до температуры 110 К, и освещался ИК светом. Условия возбуждения и параметры этого колебания так же сильно зависят от внешних воздействий, как и другие колебания тока, обнаруженные в образцах кремния, ионно-легированных или диффузионно-легированных марганцем [1, 2]. Ниже приведены зависимости амплитуды и частоты колебания от условий их возбуждения.

На рис. 2 приведены зависимости амплитуды и частоты колебания от напряженности электрического поля. При полях менее чем 1 В/см амплитуда колебания становится настолько маленькой ($I_{\phi} < 10^{-9}$ А), что затрудняет ее фиксировать, а при полях более 25 В/см появляются дополнительные гармоники и периодичность колебания нарушается, а при полях более 50 В/см колебания переходят в стохастическое автоколебание.

Из рисунка видно, что с ростом напряженности электрического поля примерно до 5 В/см амплитуда и частота колебаний фототока резко возрастают, затем рост амплитуды и частоты замедляется и при напряженностях полей 15 В/см практически достигается насыщение.

На рис. 3 приведена зависимость параметров колебания фототока от температуры при постоянном электрическом поле, энергии и интенсивности ИК-света. При этом периодическое колебание

фототока наблюдалось в интервале температур от 110 до 125 К. При температурах больше чем 125 К колебания становились стохастическими.

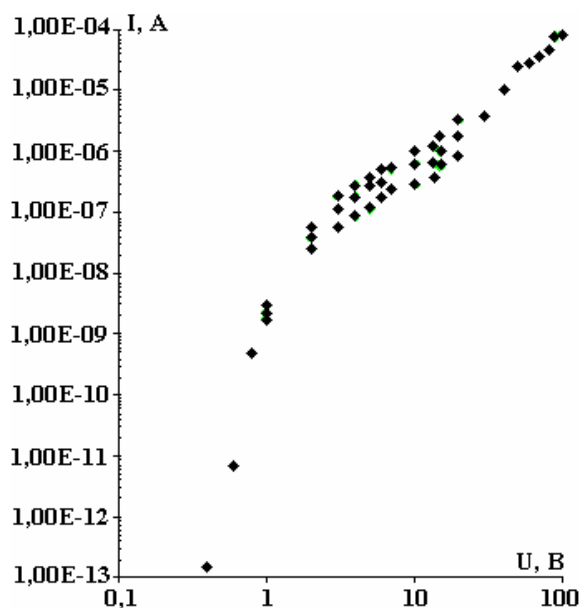


Рис. 1. ВАХ образца $Si\langle Mn \rangle$ с $\rho=9,1 \cdot 10^4$ Ом-см, снятой при $T = 115$ К; $h\nu=1,0$ эВ, $L=1,4 \cdot 10^4$ Вм/см²

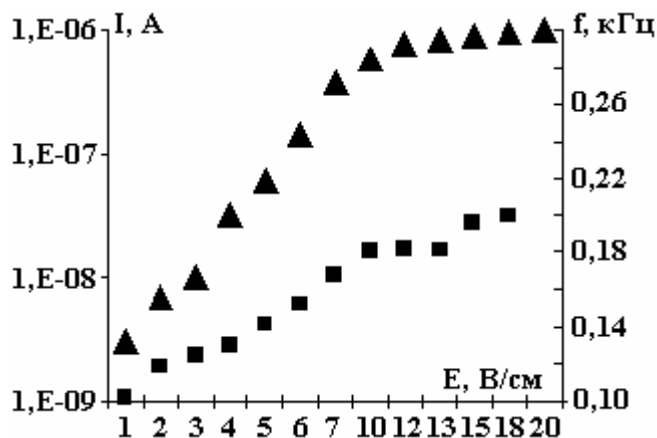


Рис. 2. Зависимости амплитуды и частоты колебания фототока от напряженности электрического поля, снятых при $T=115$ К, $h\nu=1,0$ эВ, $L=1,4 \cdot 10^4$ Вм/см².

$\Delta I = I_{max} - I_{min}$ – разность максимальных и минимальных токов при колебании фототока, то есть амплитуды колебания

С увеличением температуры амплитуда колебаний уменьшилась, а частота возросла почти линейно.

Кроме того, периодичность колебания существенным образом зависит от энергии падающего кванта ИК-света. На рис. 4 показаны зависимости параметров колебания от энергии падающих квантов. Установлено, что с увеличением энергии кванта от 0,85 до 1,15 эВ амплитуда линейно возрастает, а частота уменьшается, причем зависимость частоты от энергии кванта слабее, чем зависимость амплитуды. При энергиях падающих квантов менее 0,85 эВ колебания срывались.

На рис. 5 приведены зависимости амплитуды и частоты колебания фототока от интенсивности ИК-света.

Как видно из рисунка, с увеличением интенсивности ИК-света амплитуда и частота колебаний увеличиваются, причем зависимость параметров колебаний от интенсивности слабее, чем от остальных условий возникновения периодических колебаний фототока. Из-за ограниченной мощности ИК-света мы не смогли экспериментально определить возможность срыва колебаний при воздействии ИК-света значительной интенсивности.

Таким образом нами были определены условия возникновения и существования автоколебаний тока и зависимости параметров колебания от этих условий, которые являются очень важными для создания маломощных портативных генераторов инфранизких частот.

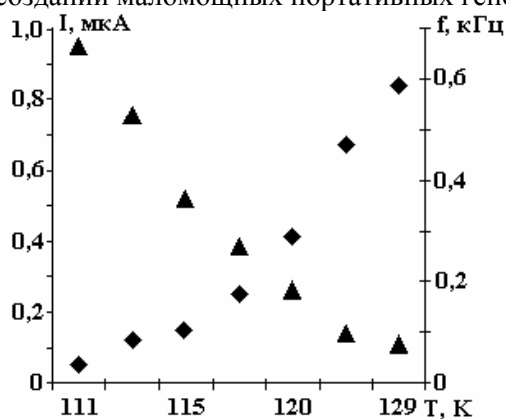


Рис. 3. Зависимости параметров колебаний фототока от температуры.

$U=10\text{ В}; h\nu=1,0\text{ эВ}; L=1,4\cdot 10^{-4}\text{ Вт/см}^2$

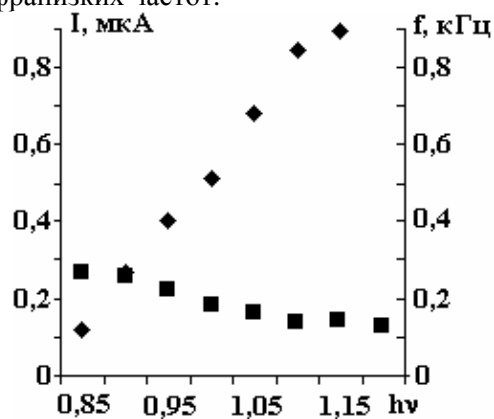


Рис. 4. Зависимости параметров колебания фототока от энергии кванта ИК-света.

$U=10\text{ В}, T=115\text{ К}, L=1,4\cdot 10^{-4}\text{ см}^2$

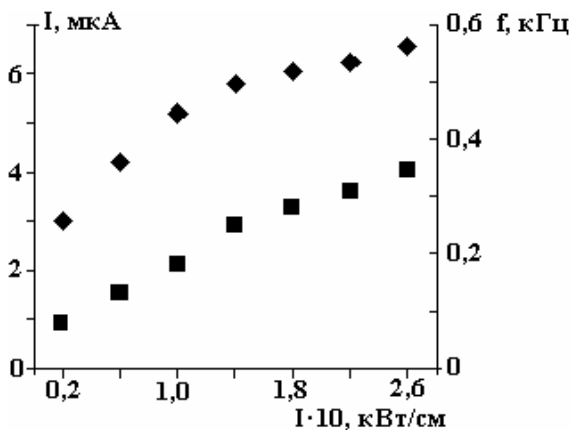


Рис. 5. Зависимости параметров колебания фототока от интенсивности ИК-света.

$U=10\text{ В}, h\nu=1,0\text{ эВ}, T=115\text{ К}$

Обсуждение результатов

Для объяснения механизма наблюдаемых автоколебаний фототока в диффузионно-легированных образцах Si<Mn> авторы работ [1, 2] использовали трехуровневую модель, предложенную С. Г. Калашниковым для объяснения колебаний фототока инфранизких частот, наблюдаемых в фотопроводящих образцах монокристаллов CdS и CdSe [3]. Причинами возникновения автоколебаний являются эффект температурного гашения фотопроводимости и образование отрицательной дифференциальной проводимости на участке ВАХ в результате джоулева нагрева кристалла. Однако эта модель дает только качественные объяснения экспериментально наблюдаемых параметров колебаний фототока для монокристаллических образцов Si<Mn>. (Здесь амплитуда тока может достигать нескольких ампер, а глубина модуляции почти $\sim 100\%$.) Далее для количественного объяснения колебаний фототока в Si<Mn> авторами работ [2] была предложена трехуровневая модель, учитывающая неравномерный характер распределения диффузионно-легированных примесей, а также образование кластеров ионов примесей, которые случайным образом приводят к модуляции соответствующих энергетических зон. По мнению авторов, случайные модулирования соответствующих зон способствуют пространственному разделению и накоплению носителей в этих зонах, и при быстром термическом перебросе наблюдается всплеск фототока с большой амплитудой. Согласно модели Калашникова одно из основных требований к примесным атомам – асимметричность сечений захвата носителей противоположных знаков. Но для обеспечения большой амплитуды тока отношение сечений захвата S_n/S_p должно быть $10^{10}-10^{12}$. Однако существующие экспериментальные данные [4] показывают, что это отношение для однократно (Mn^+ , $S_p=10^{-19}\text{ см}^2$) и двукратно (Mn^{++} , $S_n=10^{-14}\text{ см}^2$) ионизованных атомов марганца составляет порядка 10^5-10^6 , что в свою очередь затрудняет объяснение полученных экспериментальных результатов по колебаниям фототока в исследуемых нами образцах Si<Mn>. Такое большое значение отношений сечений захвата трудно связать с зарядовым состоянием лишь од-

ного атома примесей. Поэтому можно предположить, что такое большое значение сечений захвата обеспечивается наличием самоорганизованных квантовых точек (СКТ), состоящих в основном из множества атомов примесей. Известно [5, 6], что в СКТ ожидается сильное увеличение времени жизни фотовозбужденных носителей заряда вследствие так называемого эффекта фононного сужения (phonon bottleneck effect). Например, в системе Si-Ge с КТ [5] обнаружено чрезвычайно высокое значение сечения фотопоглощения ($2 \cdot 10^{-13} \text{ см}^2$), что превышает по крайней мере на порядок известные значения сечения фотоионизации для локальных центров в кремнии и на три порядка аналогичную величину для КТ в системе InAs-GaAs.

Теперь если в качестве очувствляющего центра в трехуровневой модели Калашникова приняты СКТ, состоящие из атомов марганца с большим сечением захвата носителей, то механизм и параметры наблюдаемых в экспериментах колебаний тока в образцах Si<Mn> могут быть объяснены как качественно, так и количественно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бахадырханов М. К., Аскарров Ш. И., Парманкулов И. П., Норматов А. У., Куткова О. Г., Мирбабаев У. М. Токовые неустойчивости в кремнии, ионно-легированном марганцем // Изв. АН УзССР. Серия физическая. 1986. № 3. С. 56–60.
2. Бахадырханов М.К., Зикриллаев Н.Ф. Низкочастотные колебания тока с большой амплитудой в компенсированном марганцем кремнии // Физика и техника полупроводников. 1984. Т. 18. В. 12. С. 2220–2222.
3. Калашников С. Г., Пустовойт В. И., Падо Г. С. Теория температурно-электрической неустойчивости в фотопроводящих кристаллах соединений $A^{IV}B^{VI}$ // Физика и техника полупроводников. 1970. Т. 4. В. 7. С. 1255–1261.
4. Бахадырханов М.К., Зайнобидинов С., Комилов Т.С., Тешабоев А.Т. Фотозлектрические свойства кремния, легированного марганцем // Физика и техника полупроводников. 1975. Т. 9. В. 1. С. 76–80.
5. Герасименко Н.Н. Наноразмерные структуры в имплантированных полупроводниках // Российский химический журнал. 2002. Т. XLVI. В. 5. С. 30–41.
6. Пархоменко Ю.Н., Белогорохов А.И., Герасименко Н.Н., Иржак А.В., Лисаченко М.Г. Свойства самоорганизованных SiGe-наноструктур, полученных методом ионной имплантации // Физика и техника полупроводников. 2004. Т. 38. В. 5. С. 593–597.

Поступила 06.05.08

Summary

The experimental results of research of photocurrent oscillations in silicon with quantum dots stimulated by infra-red light are presented. It is shown, that the large amplitude of oscillations (up to 1 Amper) and ~100 % depth of modulation observable in experiment can not be explained by theory Kalashnikov. For an explanation of observable photocurrent oscillations is used the self-organized quantum dots with anomalous large asymmetric section of capture of charge carriers.