

ИССЛЕДОВАНИЕ КВАЗИРАВНОВЕСНОЙ ИНДУЦИРОВАННОЙ ФОТОПРОВОДИМОСТИ В СЛАБО КОМПЕНСИРОВАННОМ ПРИМЕСНОМ КРЕМНИИ

*В.М. Зыков, А.Н. Киселев
г.Томск, Россия*

Представлены результаты исследований зависимости характеристик квазиравновесной индуцированной фотопроводимости в слабо компенсированном примесном кремнии от времени и факторов внешних условий: мощности дозы и дозы электронного излучения, интенсивности собственного возбуждения и примесной подсветки, электрического поля и температуры.

Исследование воздействия малых доз электронного излучения в условиях глубокого охлаждения позволяет изучить основные закономерности индуцированной примесной фотопроводимости (ИПФ) и проводимости в кремнии легированном бором в зависимости от электрического поля, температуры в диапазоне 8÷12 К, а также от интенсивности межзонного и примесного возбуждения. Действие малых доз электронного излучения бетатрона с энергией 6 МэВ на ИПФ исследовалось при температуре 8÷11 К на образцах р-типа кремния, легированного бором до концентрации $N_B = 10^{15} \div 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ при степени компенсации $\approx 10^{-3}$. Измерялись фототок и ток проводимости, протекающие через исследуемый образец кремния, в зависимости от времени и факторов внешних условий: мощности дозы и дозы электронного излучения, интенсивности примесной подсветки, электрического поля и температуры. Измерения проводились в активном электрическом режиме при средней мощности дозы 1÷30 рад/мин, то есть при средней плотности потока электронов $(3,4 \cdot 10^5 \div 1,6 \cdot 10^7) \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Длительность однократного воздействия электронным излучением определялась временем перехода фототока или проводимости в состояние близкое к насыщению и варьировалась в пределах (0,5–10) минуты так, что интегральный поток электронов при однократном облучении составлял $10^7 \div 10^9 \text{ см}^{-2}$. Использовались два режима примесной подсветки ($\lambda \approx 3 \text{ мкм}$): фототок примесной подсветки мал по сравнению с темновым током, определяемым фоном, и фототок примесной подсветки существенно превосходит темновой ток. При изменении проводимости исследуемого образца на нем автоматически поддерживалось неизменное напряжение смещения. В первом случае измерения велись частотно-селективным методом на частоте модуляции светового потока 70 Гц, а во втором случае измерения велись в условиях стационарной примесной подсветки и при измерении тока через образец электрометрическим усилителем.

Образцы исследуемого монокристаллического кремния, легированного бором, представляли собой (p⁺-p-p⁺)-структуры и имели размеры (2 x 1,8 x 2,5) мм³ при расстоянии между омическими контактами 2,5 мм, а также размеры (1,9 x 2,0 x 3,9) мм³ при расстоянии между омическими контактами 2,0 мм.

На первоначальном этапе эксперимента была установлена идентичность действия электронного излучения и светового излучения на длине волны 1,06 мкм, приводящих к межзонному возбуждению кремния, на долговременные изменения примесной проводимости и примесной фотопроводимости кремния. В том и в другом случае генерация электронно-дырочных пар в кремнии приводит к возрастанию тока примесной фотопроводимости и последующей его долговременной (более часа) релаксации к первоначальному значению. Скорость релаксации возрастала по мере увеличения температуры, а выдержка облученного образца при температуре выше 20 К в течение нескольких секунд и последующее охлаждение до температуры облучения полностью восстанавливали

прежнее значение фототока и темнового тока. Эти свойства позволили идентифицировать наблюдаемое явление как ИПФ. В последующем для предотвращения существенных изменений характеристик кремния из-за образования радиационных дефектов в процессе исследования свойств ИПФ, действие электронного излучения было заменено световым межзонным возбуждением, эквивалентным по объемной скорости генерации электронно-дырочных пар в кремнии. Замена электронного излучения на световое излучение с длиной волны вблизи края фундаментального поглощения при исследовании эффектов ионизации, связанных с генерацией равномерно распределенных одиночных электронно-дырочных пар, имеет дополнительные методические преимущества из-за существенно большей временной стабильности светового излучения, генерируемого излучающим диодом, по сравнению с временной стабильностью электронного излучения, выведенного из ускорителя электронов – бетатрона. В дальнейшем основные свойства ИПФ в кремнии, легированном бором, исследованы при комбинированном действии светового межзонного и светового примесного излучений, а электронное излучение использовалось только для изучения влияния образования радиационных дефектов на ИПФ.

Исследование свойств ИПФ сводится к изучению влияния таких факторов как интенсивность и длительность собственного возбуждения, температуры и электрического поля смещения. В этих исследованиях измерение примесной фотопроводимости осуществлялось в режимах малой и большой величины примесной подсветки. В первом случае фототок, обусловленный дополнительной примесной подсветкой, был меньше темнового тока, обусловленного фоном теплового излучения. Типичная температурная зависимость логарифма темнового тока и тока примесной фотопроводимости в условиях большой примесной подсветки представлена на рис. 1. Из приведенных результатов следует, что при температуре ниже 12 К темновая проводимость определяется не примесной проводимостью, а фоновой подсветкой (режим ограничения фоном). Резкое увеличение тока при температуре выше 16 К обусловлено примесной электропроводностью. Таким образом, разница между полным током и темновым током дает величину тока примесной фотопроводимости, обусловленного примесной подсветкой ($\lambda \approx 3$ мкм) от излучающего диода.

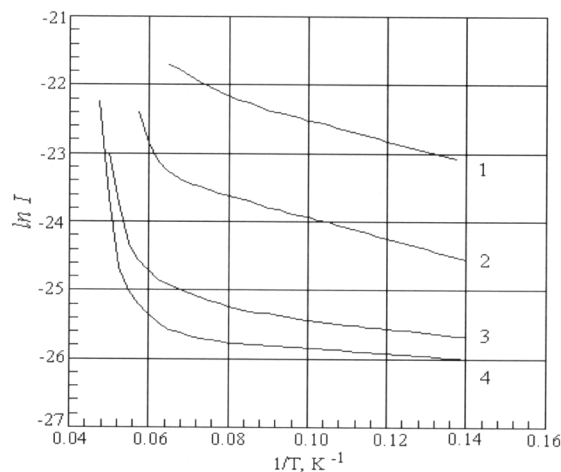


Рис. 1. Температурная зависимость логарифма тока примесной фотопроводимости ($I [A]$) при различной интенсивности примесной подсветки ($\lambda \approx 3$ мкм); 4 – темновой ток

При выборе методики изучения свойств ИПФ было принято во внимание её температурное гашение, обусловленное термическим опустошением уровней захвата при нагреве кремния выше 20 К. Исходя из этого обстоятельства была предложена и реализована методика изучения влияния поля электрического смещения, температуры и интенсивностей примесного и собственного возбуждения на кинетику ИПФ, которая

включала в себя как обязательный элемент термическое опустошение уровней захвата неосновных носителей заряда. Эта методика измерения изменений в примесной фотопроводимости и ИПФ использовала периодическое повторение цикла:

- измерение тока примесной фотопроводимости при рабочей температуре образца кремния,
- импульсное возбуждение ИПФ при неизменных внешних условиях (температура, электрическое поле, интенсивность световых воздействий) и измерение кинетики возбуждения ИПФ путем измерения фототока в промежутках между импульсами возбуждения,
- измерение релаксации ИПФ после прекращения возбуждения, кратковременный нагрев образца до температуры 25 К с последующим охлаждением до рабочей температуры,
- выдержка при рабочей температуре и контрольное измерение тока примесной фотопроводимости при рабочей температуре.

Типичное относительное изменение тока примесной фотопроводимости во времени в таком цикле для случая, когда фотопроводимость существенно превосходит темновую проводимость, представлена на рис. 2. Применен метод импульсного возбуждения ИПФ межзонной подсветкой на частоте 0,5 Гц от излучающего диода. В случае облучения электронным излучением импульсное возбуждение обеспечивается импульсным пучком бетатрона, работающем на частоте 100 Гц. Измерение ИПФ в процессе возбуждения следует производить после окончания импульса ионизирующего излучения с временной задержкой превосходящей время максвелловской релаксации, когда восстанавливается электрическая нейтральность и вклад неосновных носителей в проводимость становится пренебрежимо мал. Это позволяет отделить возникающую при межзонном возбуждении быстро релаксирующую биполярную проводимость от монополярной примесной фотопроводимости, которая медленно изменяется на стадиях возбуждения и релаксации ИПФ.

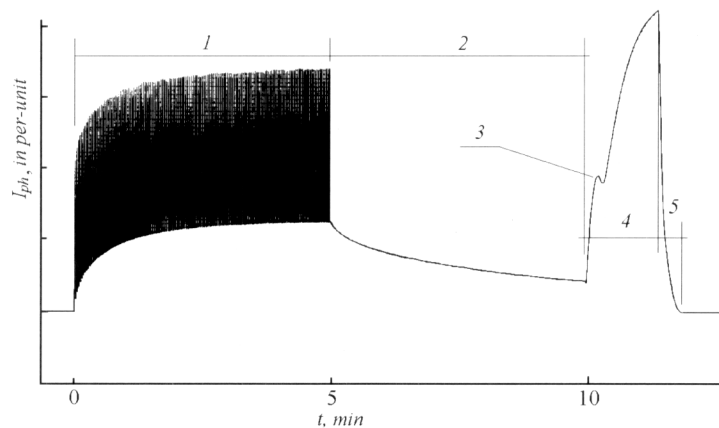


Рис. 2. Осциллограмма импульсного возбуждения и последующей релаксации индуцированной примесной фотопроводимости при $T=10,35$ К в образце $Si\langle B \rangle$ при $N_B=5 \cdot 10^{15}$ см⁻³. Обозначения: 1 – импульсное возбуждение на частоте $f=0,2$ Гц, 2 – релаксация, 3 – пик термостимулированного тока при нагреве до $T=25$ К на участке 4, 5 – охлаждение образца до рабочей температуры

Видно, что ИПФ в процессе возбуждения достигает состояния близкого к насыщению. В процессе нагрева образца после выключения собственного возбуждения появляется пик термостимулированного тока, связанный с опустошением уровней захвата неравновесных носителей заряда. Оценка энергии активации уровней захвата по положению максимума термостимулированного тока на шкале температур дает величину близкую к энер-

гии ионизации атомов фосфора в кремнии. Прямым доказательством того, что пик термостимулированного тока связан с уровнем ИПФ, служит обнаруженный нами факт корреляции величины пика термостимулированной проводимости с величиной временной задержки между выключением межзонного возбуждения и началом нагрева образца. При увеличении задержки и, соответственно, уменьшении остаточного значения ИПФ величина пика термостимулированного тока также уменьшается. После опустошения уровней захвата фотопроводимость принимает при рабочей температуре исходное значение, которое было до начала возбуждения ИПФ. Из приведенной экспериментальной зависимости следует, что эффект ИПФ целесообразно характеризовать отношением J тока примесной фотопроводимости в условиях захвата неравновесных носителей заряда к току примесной фотопроводимости в условиях опустошения уровней захвата.

Исследование температурной зависимости процесса возбуждения ИПФ показало, что при температурах выше 15 К, когда примесная проводимость образца преобладает над величиной примесной фотопроводимости, наблюдается индуцированная примесная проводимость, которая проявляется в увеличении примесной проводимости в результате биполярного возбуждения электронным излучением или светом от излучающего диода с длиной волны $\lambda \approx 1,06$ мкм. Зависимость тока, текущего через образец в процессе возбуждения и релаксации ИПФ при различных температурах в интервале от 8 К до 12 К, представлена на рис. 3 и 4. Из полученных результатов следует, что значение ИПФ в состоянии насыщения сразу после выключения межзонного возбуждения возрастает по мере роста температуры, но в то же время когда температура выше 12 К, то заметно возрастает скорость релаксации ИПФ. Из приведенных измерений следует, большой рост тока на стадии действия межзонного возбуждения при температуре $T = 8$ К обусловлен значительным относительным вкладом биполярной проводимости. На стадии релаксации ИПФ скорость релаксации растет с ростом температуры за счет увеличения скорости фототермической ионизации уровней захвата неосновных носителей заряда.

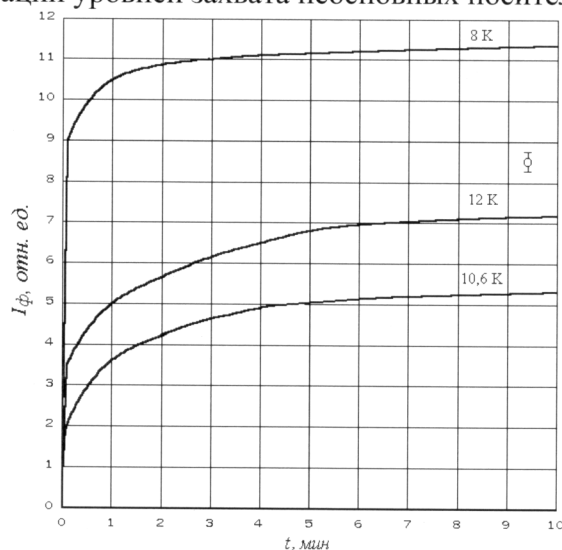


Рис. 3. Влияние температуры образца $Si\langle B \rangle$ на фототок в процессе возбуждения ИПФ (ток нормирован на равновесное значение)

Исследования влияния электрического поля на ИПФ в примесном кремнии показали, что величина ИПФ немонотонно меняется с ростом напряженности электрического поля. Оказалось, что при фиксированной температуре относительная величина J фототока через образец в стадии насыщения при возбуждения ИПФ в зависимости от напряженности электрического поля, которое задавалось в диапазоне 12÷80 В/см, характеризуется минимумом, который находится при напряженности поля около 40 В/см.

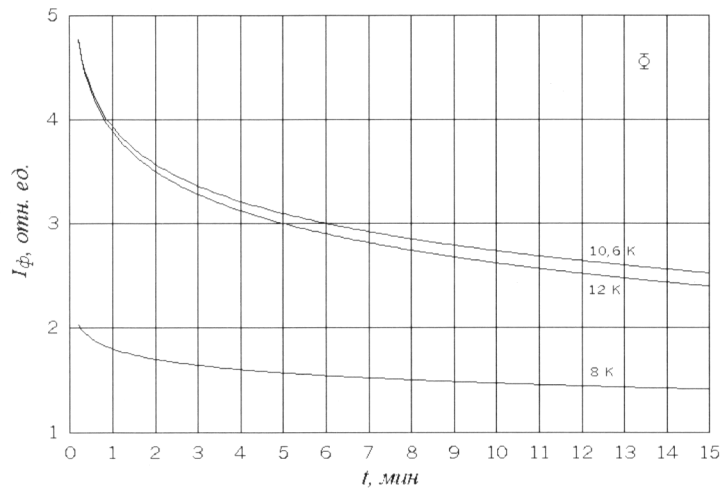


Рис. 4. Влияние температуры образца $Si\langle B \rangle$ на фототок в процессе релаксации ИПФ (фототок нормирован на равновесное значение)

При напряженности поля $12 \div 20$ В/см наблюдается значительный рост величины ИПФ (величина относительного изменения фототока J достигает значения 10 и более), а при росте напряженности поля до величины 80 В/см рост величины эффекта ИПФ не превышает 25 %. Наблюдаемая немонотонная зависимость величины ИПФ от напряженности электрического поля в кремнии обусловлена влиянием электрического поля на процесс разделения электронно-дырочных пар, процесс захвата свободных носителей заряда на ловушки и на процесс ударной ионизации центров захвата. Влияние поля на два последних процесса обуславливает наблюдаемую полевую зависимость релаксации ИПФ. Действительно, для процесса долговременной релаксации ИПФ наблюдается монотонное увеличение скорости релаксации с увеличением напряженности электрического поля в кремнии. В качестве примера на рис. 5 и 6 показано относительное изменение тока через образец кремния ($T=10,6$ К, $N_B \approx 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$) для напряжения смещения $U_{см}=10$ В и $U_{см}=20$ В в процессе межзонного возбуждения и релаксации ИПФ соответственно.

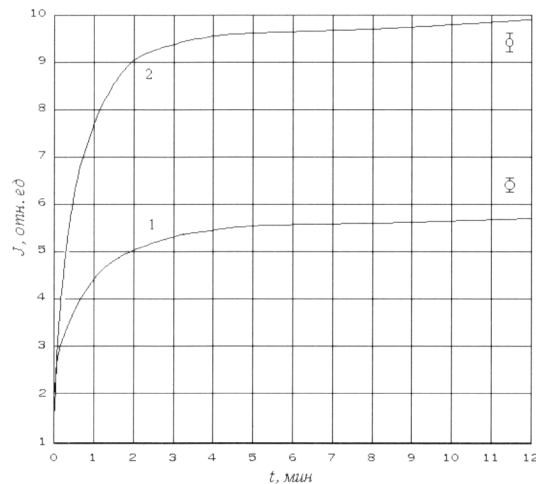


Рис. 5. Возбуждение ИПФ в $Si\langle B \rangle$ ($N_B = 5 \cdot 10^{15}$ см $^{-3}$, $T=10,6$ К) при различном напряжении смещения: 1 – 10 В, 2 – 20 В

Очевидно, что в процессе возбуждения ИПФ увеличение напряженности электрического поля существенно повышает проводимость за счет увеличения эффективности разделения электронно-дырочных пар, а в процессе релаксации увеличение поля существенно

повышает эффективность ионизации центров захвата. Следует отметить, что при подаче на этот образец кремния микросекундного импульса напряжения, обеспечивающего напряженность электрического поля порядка 200 В/см и более, наблюдается быстрая ударная ионизация большей части центров захвата электронов и происходит гашение ИПФ. Дальнейшие исследования показали, что подача импульсного смещения величиной выше порога примесного пробоя не обеспечивает полной ионизации компенсирующих примесей, как это имеет место при нагреве образца выше температуры ионизации примеси. Именно по этой причине для восстановления исходного зарядового состояния примесей и дефектов в исследуемых образцах примесного кремния нами использовался метод термического опустошения путем нагрева образцов до температуры $T=25$ К или выше.

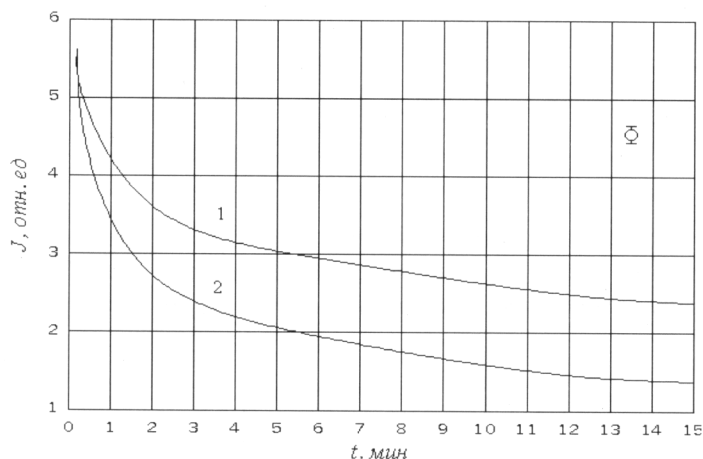


Рис. 6. Релаксация ИПФ в $Si\langle B \rangle$ ($N_B = 5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$, $T=10,6 \text{ К}$) при различном напряжении смещения: 1 – 10 В, 2 – 20 В

В работе [1] отмечено, что влияние сильного электрического поля смещения на кинетику ИПФ может быть связано как с ударной ионизацией примесей электрическим полем, так и с разогревом фотоносителей, когда их скорость начинает превышать скорость звука. Как известно, высокая обнаружительная способность примесных фоторезисторов достигается при относительно больших электрических полях предшествующих примесному пробоя. В слабом электрическом поле (≈ 1 В/см) и концентрации бора не выше $5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ A^+ -состояния не проявляются в широком диапазоне температур [2]. В то же время при поле ≈ 90 В/см и температуре ниже 8 К время жизни фотодырок в $Si\langle B \rangle$ начинает резко уменьшаться, что свидетельствует о том что концентрация N_A^+ -состояний превышает концентрацию компенсирующих примесей и дефектов N_D .

Выполненные исследования показали также, что электрическое поле смещения существенным образом влияет на величину интенсивности межзонного возбуждения, при которой достигается насыщение релаксационной зависимости ИПФ. При напряженности поля 40÷50 В/см и менее уже при малой мощности межзонного возбуждения достигается насыщение величины ИПФ. Это иллюстрируется экспериментально полученными результатами, представленными на рис. 7 и 8. Из приведенного примера следует, что при увеличении напряженности поля выше 40 В/см из-за роста скорости ионизации компенсирующих примесей и дефектов становится проблематичным достижение насыщения ИПФ в процессе ее возбуждения. Увеличение интенсивности межзонного возбуждения в этих условиях с целью достижения насыщения ИПФ приводит к понижению величины ИПФ из-за уменьшения максимально достижимой степени перезарядки примесей. Далее в наших исследованиях мы ограничились полями 40÷50 В/см так, что большая часть исследований выполнена при величине напряжению смещения на образце 10 В (напряженность поля 40 В/см).

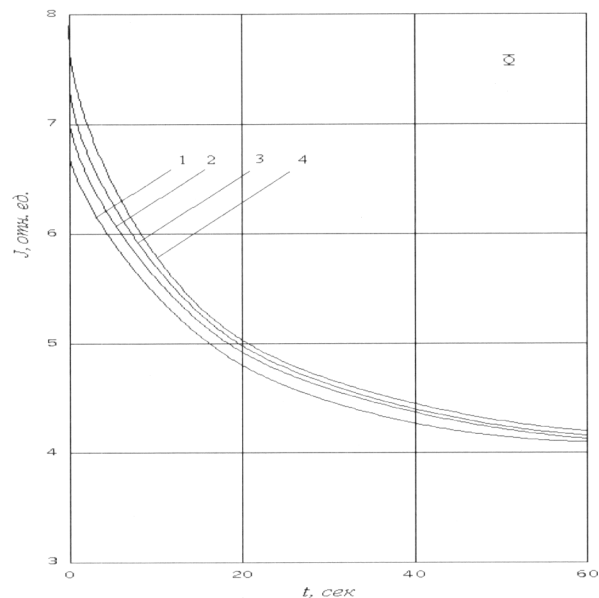


Рис. 7. Релаксация тока ИПФ при напряжении смещения 10 В и различной интенсивности межзонного возбуждения $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$ (значения интенсивности с соседними индексами различаются в 1,5 раза)

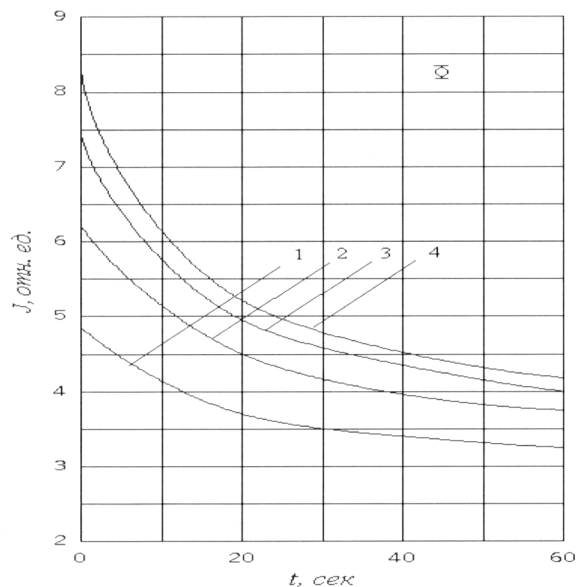


Рис. 8. Релаксация тока ИПФ при напряжении смещения 20 В и различной интенсивности межзонного возбуждения $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$

Учитывая исследованные свойства ИПФ, все дальнейшие измерения ИПФ велись при такой напряженности электрического поля в примесном кремнии, при которой ударная ионизация примесей еще не является определяющим фактором ионизации центров захвата неосновных носителей заряда.

Дальнейшие исследования процесса релаксации ИПФ после длительного (порядка 1 часа) действия межзонного возбуждения светом с длиной волны вблизи края фундаментального поглощения показали, что в образцах Si, облученных большими дозами электронного излучения, наблюдается постепенное увеличение остаточной проводимости после прогрева их до температуры 25 К. Это можно объяснить захватом электронов на более глубокие центры, связанные с радиационными дефектами. Остаточная проводимость исчезает только после кратковременной выдержки образцов при температуре 35 К.

Список литературы

1. Выставкин А.Н., Годик Э.Э., Губанков В.Н. и др. Высокочувствительные приемники электромагнитных излучений // В. кн.: Проблемы современной радиотехники и электроники / под. ред. В.А. Котельникова. – М.: Наука, 1982. – С. 359–412.
2. Годик Э.Э., Курицын Ю.А., Синис В.П. Захват дырок нейтральными атомами бора в кремнии // Письма в ЖЭТФ. – 1971. – Т. 14. – С. 377–379.

ИССЛЕДОВАНИЕ РАДИАЦИОННО-ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПРИМЕСНОМ КРЕМНИИ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ БЫСТРЫМИ ЭЛЕКТРОНАМИ В УСЛОВИЯХ ГЛУБОКОГО ОХЛАЖДЕНИЯ

*В.М. Зыков, А.Н. Киселев
г. Томск, Россия*

Представлены результаты исследований долговременных фотоэлектрических процессов в кремниевых p^+n-p^+ структурах, инициированных действием быстрых электронов в условиях, моделирующих воздействие факторов окружающего космического пространства. Рассмотрена нелинейная модель этих процессов, пригодная для оценки параметров примесных полупроводников в условиях их ускоренных лабораторных испытаний, а также для прогнозирования изменений этих параметров в натуральных условиях эксплуатации примесных полупроводниковых структур в составе бортовых приборов космических аппаратов.

Представлены результаты исследований долговременных фотоэлектрических процессов в кремниевых p^+n-p^+ структурах, инициированных действием быстрых электронов в условиях, моделирующих воздействие факторов окружающего космического пространства. Рассмотрена нелинейная модель этих процессов, пригодная для оценки параметров примесных полупроводников в условиях их ускоренных лабораторных испытаний, а также для прогнозирования изменений этих параметров в натуральных условиях эксплуатации примесных полупроводниковых структур в составе бортовых приборов космических аппаратов.

Фотоприемные устройства с глубоководохлаждаемыми фотоприемниками на основе монокристаллического примесного кремния обеспечили достижение рекордной обнаружительной способности, приближающейся к теоретическому пределу даже в условиях низкого фона [1]. В связи с этим основной областью применения примесных фоторезисторов стала космическая оптико-электронная аппаратура. Вместе с тем мировая статистика показывает, что более 30 % отказов космических аппаратов произошедших за 90-е годы связаны с воздействием ионизирующих излучений [2]. При сроке активного существования космического аппарата 20 лет и более уровни требований по радиационной стойкости близки к физическим возможностям изделий полупроводниковой электроники [3], поэтому проблема обеспечения радиационной стойкости электронной аппаратуры приобретает особо важное значение. Одним из направлений решения этой проблемы считается совершенствование методов лабораторных испытаний и прогнозирования работоспособности электронных полупроводниковых приборов в космических условиях. Важной задачей при этом считается учет режимов функционирования электронных приборов в натуральных условиях и в процессе наземных испытаний [4].

Значительная часть инициированных ионизирующими излучениями долговременных процессов связана с захватом неравновесных носителей заряда на ловушки в объеме