

X-RAY SELECTIVE FILTER BASED ON THE EFFECT OF COMPLETE PUMPING

A. R. MKRTCHYAN, V. KH. MIRZOYAN, S. N. NOREYAN

Using the effect of complete pumping of X-rays under the action of temperature gradient, an X-ray selective band filter was obtained within the range of $0.2 \text{ \AA}$ – $1.6 \text{ \AA}$, when the angular aperture of the incident beam in the reflection plane is smaller than the width of Darwin table of the filter reflection plane. The filtered bandwidth is nearly equal to the X-ray characteristic bandwidth. When a perfect thin quartz monocrystal is used as a filter ($\mu t \sim 0.5$, where μ is the linear absorption factor of the crystal for the given wave, t is the thickness), then it does not much distort the transmitted X-ray spectrum. Under the above conditions, a decrease of the absorption factor of the crystal (filter) for waves transmitting in the primary direction is also obtained.

Изв. АН Армянской ССР, Физика, т. 25, вып. 1, 51–58 (1990)

УДК 621.383.4

ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ СТРУКТУРЫ НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С ГЛУБОКИМИ ЦЕНТРАМИ, ОБЛУЧЕННЫЕ ПОТОКАМИ БЫСТРЫХ ЭЛЕКТРОНОВ

В. М. АРУТЮНЯН, З. Н. АДАМЯН, Р. С. БАРСЕГЯН, Б. О. СЕМЕРДЖЯН

Ереванский государственный университет

Р. А. МЕЛКОНЯН

Ереванский физический институт

(Поступила в редакцию 5 января 1989 г.)

Проведены исследования характеристик фоторезисторов (ФР) и инжекционных фотодиодов (ИФД) на основе $Si\langle Ni \rangle$, $Si\langle S \rangle$ и $Si\langle Zn \rangle$ и их устойчивости к воздействию потока быстрых электронов с энергией 50 МэВ. Метод низкотемпературного отжига (НТО) совместно с рекомбинационно-стимулированным отжигом (РСО) был использован для удаления радиационных повреждений из примесных ФР и ИФД.

Характеристики фотоэлектронных полупроводниковых приборов определяются их параметрами, которые, как известно, непосредственно связаны с параметрами полупроводникового материала, на основе которого изготовлен фотоприемник (ФП). Поэтому устойчивость фотоэлектрических свойств примесных ФР и ИФД в значительной степени определяется радиационной стойкостью полупроводникового материала. Интерес с точки зрения физики протекающих процессов дефектообразования представляет облучение быстрыми электронами. Этот вид радиации позволяет при хорошо контролируемых условиях вводить в кристалл простейшие дефекты — вакансии и междоузельные атомы. При энергии электронов E_e , превышающей $10 \div 15 \text{ МэВ}$, имеется конечная вероятность возникновения локаль-

ного скопления дефектов. Глубина уровней центров в запрещенной зоне E_g влияет на ход радиационных процессов, имеют место накопление и отжиг дефектов, примесные перестройки и др. Когда облучение ведется при комнатной температуре, эти дефекты не остаются на месте, они быстро мигрируют благодаря достаточно низкой энергии активации диффузий. Как правило, электрическую активность в n -кремнии имеют только центры акцепторного типа, в материале p -типа — только донорные центры [1—3].

Исходным материалом являлись кремниевые шайбы марки КДБ с проводимостью p -типа с удельным сопротивлением $\rho =$ от $0,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$, до $7 \cdot 10^4 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ с толщиной $0,7 \div 0,9 \text{ мм}$, нарезанные по плоскости $\langle 111 \rangle$. Для измерения эффекта Холла были изготовлены образцы с конфигурацией контактов Ван-дер-Пау. Измерения фотоэлектрических характеристик ФР и ИФД до и после облучения проводились по методикам, описанным в [4, 5]. С целью определения интегральной чувствительности в условиях регистрации слабого света использован источник с планковским распределением излучения. Планковский источник имел температуру 500 К . Излучение от него падало на ФП через механический модулятор с электромагнитным генератором опорного сигнала. Частотная характеристика и быстродействие ФП определялись методом введения сигнала модуляции в цепь ФП. Питание образцов осуществлялось с помощью батарей, напряженность приложенного к приемнику поля изменялась до $350 \text{ В}\cdot\text{см}^{-1}$. С целью устранения паразитного влияния емкости кабеля, входящего в криостат, использован предусилитель на полевом транзисторе с операционным усилителем. Входная емкость предусилителя была компенсирована (охвачена обратной связью), благодаря чему частотный диапазон предусилителя был расширен.

После усиления регистрировались полезный сигнал и шумы приемника, что необходимо для определения интегральной чувствительности и обнаружительной способности. Для испытания детектора был использован ИК коллиматор с черным телом, поддерживаемым при температуре 500 К . Главными частями двухзеркального коллиматора являются зеркальная оптика и планковский излучатель, расположенный в фокусе оптики. Коллиматор позволил точно обеспечить известную облученность.

Переменная составляющая облученности на образце была равна $2,8 \text{ мкВт}\cdot\text{см}^{-2}$.

С учетом коэффициента диффузии и растворимости S , Ni , Zn в кремнии нами был подобран такой режим термообработки, чтобы концентрация компенсирующей (N_D) и мелкой (N_A) примесей находились бы в следующем соотношении: $N_D < N_A < 2 N_D$. Были получены компенсированный высокоомный кремний как p -, так и n -типа проводимости, из которого были изготовлены инжекционные ФП p^+-n-n^+ и p^+-p-n^+ -типа. Для изготовления ИФД и ФР необходимо было обеспечить осаждение диэлектрических масок на поверхности пластин. Максимальная концентрация электрически активных примесей, введенных в Si , составляла: $S \approx 1 \cdot 10^{16}$, $Ni \approx 3 \cdot 10^{14}$, $Zn \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [6].

Температурная зависимость холловской подвижности описывается уравнением Бардина—Шокли в широком диапазоне температур, что сви-

детальствует о том, что вплоть до температур ~ 200 К превалирует акустическое рассеяние. Концентрация n , полученная из температурной зависимости концентрации свободных носителей, которая была определена из измерений Холла и проводимости, описывается известной формулой

$$n = \sqrt{\frac{N_D \cdot N_c}{2}} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (1)$$

в температурном диапазоне $90 \div 280$ К, при более низких температурах

$$n = \frac{1}{2} \cdot \frac{N_D \cdot N_c}{N_A} \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right), \quad (2)$$

где N_D — концентрация электрически активных атомов серы; N_A — концентрация остаточных акцепторных состояний. Остальные обозначения — обычные.

Облучение проводилось на линейном ускорителе при комнатной температуре. При этом энергия электронов составляла 50 МэВ, интегральный поток менялся от $4 \cdot 10^{14}$ до $3 \cdot 10^{15}$ см $^{-2}$.

Проводимость образцов, содержащих разупорядоченные области, уменьшается после облучения, с одной стороны, вследствие образования потенциальных барьеров, окружающих разупорядоченные области [7], которые ограничивают ток основных носителей, т. е. уменьшается одновременно подвижность основных носителей, с другой стороны, из-за уменьшения концентрации свободных носителей вследствие захвата на глубокие центры, образованные облучением электронами. Важно отметить, что влияние поврежденных областей на измеряемую подвижность проявляется, с одной стороны, в виде поляризационного эффекта, обусловленного изменением во внешнем поле напряженности внутреннего электрического поля, действующего на основные носители, с другой — в виде электрического эффекта, проявляющегося в дополнительном рассеянии носителей в поле пространственного заряда, окружающем поврежденные области. Это влияние становится ощутимым при достаточно высокой концентрации поврежденных областей, когда длина свободного пробега носителей, связанная с механизмом рассеяния на этих областях, оказывается сравнимой с длиной свободного пробега, определяемой другими механизмами рассеяния.

Облучение кремния, легированного серой, уменьшает концентрацию электрически активных атомов серы, создающих уровни $E_c - 0,18$ эВ. Концентрация $N_D - N_A$ (имеется в виду концентрация электрически активных центров серы с уровнем $E_c - 0,18$ эВ) уменьшается с увеличением потока электронов с энергией 50 МэВ.

При нагреве гантелеобразных образцов, изготовленных из p - $Si < S >$ и облученных быстрыми электронами, происходит отжиг части дефектов. Зависимость доли неотожженных дефектов — f от изохронного отжига по 30 мин. показывает резкий спад около 350° . От значения f , равного ~ 1 при 300° , он приближается к значению $\sim 0,2$ при 350° . Для ФР на основе p - $Si < Zn >$ и p - $Si < Ni >$ зависимость доли неотожженных дефектов от изохронного отжига по 30 мин. также показала резкий спад около 400° . От значения f , равного ~ 1 при 350° , он приблизился к значению $\sim 0,25$ при 400° .

Были проведены совместно НТО ($T = 250^\circ$) и осуществляемый пропуском через ИФД прямо смещающего тока (плотность тока используемого в этом случае была $\sim 1 \text{ а/см}^2$) РСО процессы (в течение ~ 30 мин). Это привело к уменьшению доли неотожженных дефектов f для $n\text{-Si} < S >$ до $\sim 0,3$, для $p\text{-Si} < Zn >$ до $\sim 0,28$ и для $p\text{-Si} < Ni >$ до $0,31$.

Прямые ветви семейства вольт-амперных характеристик (ВАХ) ИФД и ФР из $n\text{-Si} < S >$ и $p\text{-Si} < Zn >$ ($T = 77 \text{ К}$) после облучения электронами ($T = 300 \text{ К}$, $\Phi = 3,3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) уменьшают свой наклон вдвое. При проведении НТО и РСО процессов семейство кривых ВАХ облученных ИФД и ФР частично восстанавливается, а экспериментальные значения приближаются к $\sim 80\%$ своих первоначальных значений.

Радиационная стойкость ФП определяется степенью деградации значений удельной обнаружительной способности (УОС) — D_k^* . Если D_k^* ограничивается шумами фонового излучения (режим ОФ), для этого требуется, чтобы на параметры материала и конструкции фотонных приемников налагались следующие условия: 1. $E_{\text{возб}} = hc/\lambda_p$ — условие определяет спектральную характеристику; 2. $\eta G^2 S \gg T_d(V)/q \Phi_{\text{фон}}$ — условие обычно ограничивает максимальную рабочую температуру; 3. $\eta G^2 RS \gg kT/q^2 \Phi_{\text{фон}}$ — условие позволяет приблизиться к режиму ОФ при температуре, определяемой условием 2; 4. $\eta \rightarrow 1$ — условие позволяет получить предельное значение D_k^* (режим ОФ), где η — квантовая эффективность; $\Phi_{\text{фон}}$ — плотность потока фонового излучения; $I_d(V)$ — зависящий от напряжения темновой ток; G — коэффициент фотоэлектрического усиления; R — темновое сопротивление при нулевом смещении; S — площадь чувствительной площадки.

Время жизни неосновных носителей, а подвижность в меньшей степени, монотонно падает при облучении. Его уменьшение является в соответствии с (1—4) основной причиной наблюдаемого при облучении снижения обнаружительной способности у примесных фотосопротивлений.

Воздействие потока быстрых электронов на ИФД приводит к уменьшению подвижности и концентрации основных носителей, а также снижению времени жизни неосновных носителей в базе ИФД и увеличению времени пролета через базу, что в свою очередь, вызывает уменьшение коэффициента усиления эквивалентного ФР. При облучении быстрыми электронами ухудшаются также и инжекционные свойства перехода. P - n -переход в пределе становится высокоомным сопротивлением, лишенным выпрямляющих (инжектирующих) свойств [2].

В таблице даны основные прикладные характеристики ФР и ИФД на основе $Si < Ni >$, $Si < Zn >$, и $Si < S >$, работающих в примесной области спектра и при $\lambda = 0,85 \text{ мкм}$. В таблице: ΔE — энергия термической ионизации; T_{BLTP} — температура, при которой интенсивность шумов в ФП, обусловленная флуктуациями излучения фона, равна интенсивности собственных (темновых) шумов ФП; λ_p — пиковая длина волны спектра фоточувствительности ФП при T_{BLTP} ; S_p — максимальное значение абсолютной токовой чувствительности ФП; θ — угол обзора на фон; τ — быстродействие ФП [8].

Из измерений G оценено время жизни и коэффициент безызлучательной рекомбинации — B (для $Si < Ni > - 2 \cdot 10^{-7}$, $Si < Zn > - 6 \cdot 10^{-7}$, $Si < S > - 9 \cdot 10^{-2} \text{ см}^3 \text{ с}^{-1}$).

Низкоэнергетический край нормированных спектров относительной фоточувствительности, зарегистрированных при температуре 77 К и 102 К ($Si < S >$) до и после облучения ($\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) — λ_c , смещается в длинноволновую сторону. Это, вероятно, связано с тем, что в запрещенной зоне образуются новые энергетические уровни (рис. 1).

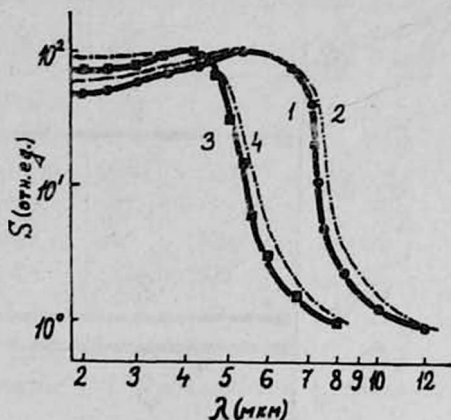


Рис. 1. Спектры относительной фоточувствительности — S , зарегистрированные при температуре 77 К и 102 К ($Si < S >$) до и после облучения. $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Коротковолновой край смещается в обратную — высокоэнергетическую сторону спектра примесной фоточувствительности.

После облучения $n - Si < S >$ электронами с дозой $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ величины абсолютных значений $D_p^*(T)$ и $S_p^*(T)$ резко уменьшаются, а ФП уже не может работать в режиме ограничения фоном (ОФ) при $\theta = 40^\circ$ [8,9]. Он будет работать в режиме ОФ при $\theta = 45^\circ$, т. е. при большом уровне фона — $\Phi_{ф.н.}$ (рис. 2).

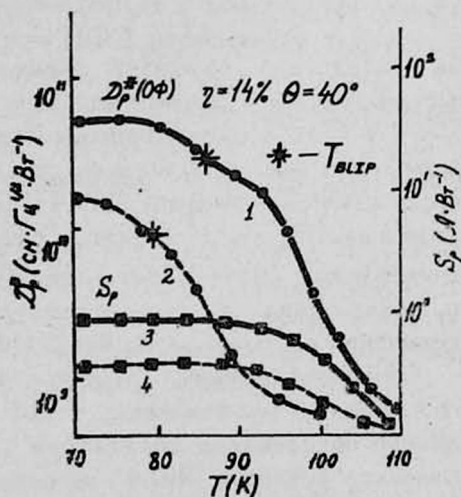


Рис. 2. Экспериментальные значения температурной зависимости УОС — D_p^* и фоточувствительности — S_p^* типичного образца с максимальной D_p^* ($Si < S >$) до и после облучения. $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$.

Температурный спад максимального значения токовой чувствительности вследствие облучения электронами наступает при меньших температурах, чем до облучения.

Температура $T_{\text{ВЛР}}$ перехода в режим ОФ также уменьшается и достигает 79 К.

Частотная зависимость УОС и чувствительности детектора на основе $\text{Si} \langle S \rangle$ до и после облучения электронами при дозе $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ изменяется в сторону уменьшения критической частоты f_c (f_c — частота, при которой значение частотно-зависимой характеристики ФП уменьшается в 2 раза). Дозовые зависимости D_p^* и S_p^* ФР на основе $n\text{-Si} \langle S \rangle$, $p\text{-Si} \langle \text{Ni} \rangle$ и $p\text{-Si} \langle \text{Zn} \rangle$ (рис. 3),

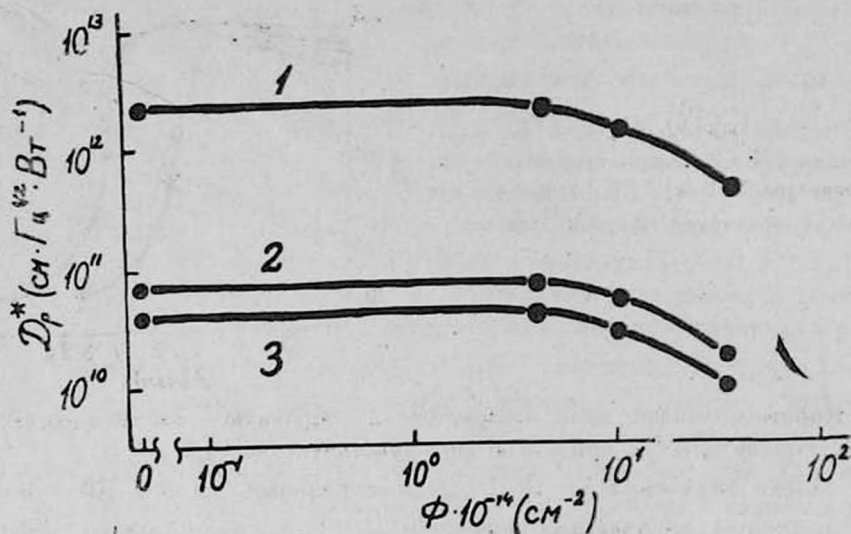


Рис. 3. Зависимость УОС ФР (в примесной области спектра) — D_p^* на основе $\text{Si} \langle S \rangle$ — 1; $\text{Si} \langle \text{Ni} \rangle$ — 2; $\text{Si} \langle \text{Zn} \rangle$ — 3, от дозы облучения быстрыми электронами.

как и следовало ожидать, плавно спадают к меньшим значениям. Быстродействие τ также уменьшается. Так как эти ФП — высокоомные ($R \sim 10^9 \text{ Ом}$), а нагрузочные сопротивления того же порядка, то быстродействие определяется входной емкостью предусилителя и сопротивлением нагрузки ФР. После облучения сопротивление ФР увеличивается, что приводит к падению быстродействия ФП. Дозовые значения D_p^* и S_p^* (при $\lambda_p = 0,95 \text{ мкм}$), как и в примесной области, плавно спадают к меньшим значениям. Быстродействие τ из-за увеличения сопротивления базы ИФД также уменьшается.

Значения токовых чувствительностей (при $T = 77 \text{ К}$) уменьшаются, причем это изменение у ИФД намного больше, чем у ФР. Это явление обусловлено механизмом инжекционного усиления. Фотоэлектрическое усиление ИФД на основе $n\text{-Si} \langle S \rangle$ в τ_p/t_p раз больше [10, 11] коэффициентов фотоэлектрического усиления сопряженного

ФР, а отношения τ_p/t_p , как и τ_n/t_n очень чувствительны к облучению быстрыми электронами.

ФР на основе $p\text{-Si} < \text{Zn} >$ после облучения электронами с дозой $\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ и энергией 50 МэВ также ухудшает свои детектирующие свойства. ФП уже не может работать в режиме ОФ с углом зрения на фон 30° . Чтобы все же он работал в режиме ОФ, необходимо раскрыть поле зрения ФП, т. е. увеличить интенсивность флуктуаций фона. УОС ФР и

Детекторы	ΔE (МэВ)	λ_p (мкм)	λ_n (мкм)	η (%)	S_p (А/Вт)	T^* (К)	τ (мксек)	$D_p^* \cdot 10^{-10}$ ($\text{см}^2 \text{Гц}^{-1/2} \text{Вт}^{-1}$)
$Si < S > / u$	180	5,5	8	15	0,3/1450	85/17	20/80	5,15/3,1
$Si < Zn > / u$	310	2,5	4	21	0,2/1210	110/90	200/500	2,0/190
$Si < Ni > / u$	220	4,9	7,2	17	0,3/1290	95/88	2/37	8,5/6,8
$Si < Ni > / u$		0,95			1700	77	1	70
$Si < Zn > / u$		0,95			1920	100	10000	75
$Si < S > / u$		0,95			1810	77	300	85

ИФД при облучении с $\Phi = 10^{15} \text{ см}^{-2}$ уменьшается вдвое.

Температура $T_{\text{ВЛР}}$ перехода в режим ОФ уменьшается и достигает значения 98 К.

Спад максимального значения токовой чувствительности наступает при более низкой температуре, чем до облучения.

После облучения образцов критическая частота ($f_c \approx 10^5 \text{ Гц}$) частотной зависимости максимального значения УОС и чувствительности детектора на основе $p\text{-Si} < \text{Zn} >$ уменьшается в два раза.

Под действием облучения быстрыми электронами ($\Phi = 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$) чувствительность в собственной области спектра поглощения ИФД уменьшается в 1,5 раза больше, чем в примесной. Как и в случае ФР—форма спектра примесной фоточувствительности ИФД расширяется, а максимум слегка смещается в длинноволновую сторону.

Применение НТО РСО процесса с целью восстановления первоначальных пороговых характеристик ФР на основе $Si < Ni >$, $Si < S >$ и $Si < Zn >$ привело к восстановлению УОС до 50% своего значения до облучения.

Сравнение пороговых характеристик ИФД на основе $Si < Ni >$, $Si < S >$ и $Si < Zn >$, зарегистрированных после НТО и без РСО—процесса, показало, что РСО процесс эффективен в вопросе восстановления первоначальных пороговых характеристик ИФД. УОС ИФД восстанавливается до $\sim 70\%$ своего значения до облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Фотоприемники видимого и ИК диапазонов. Под ред. Р. Дж. Кисса. Пер. с англ. М.: Радио и связь, 1985, 328 с.
2. Васильев В. С., Ухин Н. А. Радиационные дефекты в полупроводниковых приборах. М.: Атомиздат, 1969, 320 с.
3. Миллис А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. Пер. с англ. М.: Мир, 1975, 564 с.

4. Арутюнян В. М., Барсегян Р. С., Семерджян Б. О. Физика, Межвузовский сб. научных тр. Неравновесные процессы в п/п. Ереван: Изд. ЕГУ, 7, 5, 1987.
5. Семерджян Б. О. Молодой научный сотрудник. Ереван: Изд. ЕГУ, 2, 111 (1982).
6. Арутюнян В. М. Генерационно-рекомбинационные эффекты и двойная инжекция в полупроводниках. Ереван: Изд. АН АрмССР, 1977, 324 с.
7. Емцев В. В., Машовец Т. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках. Под ред. С. М. Рывкина. М.: Радио и связь, 1981, 248 с.
8. Полупроводниковые фотоприемники. Под ред. В. И. Стафеева. М.: Радио и связь, 1984, 216 с.
9. Гарин Б. М., Стафеев В. И. Физика и техника полупроводников, 6, 78 (1972).
10. Harutyunyan V. M. et al. Infrared Physics, 26, 267 (1986).
11. Арутюнян В. М., Барсегян Р. С., Семерджян Б. О. Физика и техника полупроводников, 18, 2236 (1985).

ԱՐԱԳ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ ՓԼՋԵՐՈՎ ՃԱՌԱԳԱՅԹՎԱՄ ԽՈՐԸ ՄԱԿԱՐԴԱԿՆԵՐՈՎ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԵ ՖՈՏՈԶԳԱՅՈՒՆ ՍՏՐՈՒԿՏՈՒՐԱՆԵՐ

Վ. Մ. ՀԱՐՈՒԹՅՈՒՆՅԱՆ, Զ. Ն. ԱԴԱՄՅԱՆ, Ռ. Ս. ԲԱՐՍԵԳՅԱՆ,
Բ. Օ. ՍԵՄԵՐԺՅԱՆ, Ռ. Օ. ՄԵԼՔՈՆՅԱՆ

Հետազոտվել են սիլիցոն ($Si<Ni>$, $Si<S>$ և $Si<Zn>$) ֆոտոդիմագրոթյունների (ΦT) և ինժեկցիոն ($I\Phi T$) ֆոտոդիոդների բնութագրերը և նրանց կայունությունը 50 ՄեՎ էներգիայով արագ էլեկտրոնների ինչի ազդեցության տակ: Խառնորդային ΦT և $I\Phi T$ -ում աղիացիոն վնասվածքների հետաքննման համար օգտագործված են ցածր ջերմաստիճանային թրծման և վերամիավորումով դրդված թրծման մեթոդներ:

PHOTOSENSITIVE STRUCTURES ON THE BASIS OF SILICON WITH DEEP CENTERS IRRADIATED WITH FAST ELECTRONS FLUXES

V. M. HARUTYUNYAN, Z. N. ADAMYAN, R. S. BARSEGYAN,
B. O. SEMERDYIAN

Characteristics of photoresistors (PR) and injection photodiodes (IPD) on the basis of $Si<Ni>$, $Si<S>$ and $Si<Zn>$ and their stability at the irradiation with 50 MeV electron were investigated. The method of low temperature annealing together with recombination stimulated annealing was used for the extraction of radiation damages in impurity PR and IPD.