

06.2;10

## Создание профильного распределения концентрации рекомбинационных центров при электронном облучении кремния

© И.В. Грехов, Л.С. Костина, В.В. Козловский, В.Н. Ломасов,  
А.В. Рожков

Физико-технический институт им А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург  
Санкт-Петербургский государственный политехнический университет  
E-mail: rozh@hv.ioffe.rssi.ru

Поступило в Редакцию 13 декабря 2010 г.

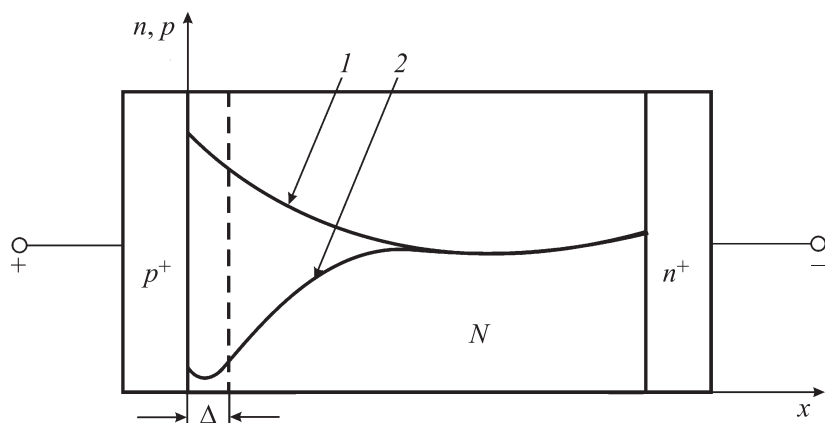
Показана возможность создания профильного распределения концентрации рекомбинационных центров в высоковольтных кремниевых  $p^+Nn^+$ -диодах путем обычного электронного облучения в определенном диапазоне энергий. Приводятся результаты исследования основных статических и динамических характеристик.

Облучение электронами с энергией в единицы MeV в настоящее время является одним из основных методов регулирования времени жизни неосновных носителей ( $\tau$ ) в полупроводниковых приборах и широко используются, например, в производстве кремниевых приборов силовой электроники. Основным рекомбинационным центром, образующихся при облучении и контролирующим  $\tau$  при высоком уровне инжекции, является так называемый А-центр (комплекс вакансии–кислород). Концентрация этих центров может регулироваться в широких пределах с высокой точностью подбором соответствующей дозы облучения, а распределение концентрации вдоль направления пучка практически однородно даже при самых больших толщинах базовых слоев (до 1–2 mm), поскольку средняя потеря энергии электронов вследствие рассеяния на атомах решетки не превышает  $0.4 \text{ keV}/\mu\text{m}$  [1]. Принципиальным преимуществом метода является также то, что облучаемый объект находится в открытом объеме, а электронный пучок к нему выводится из ускорителя через металлическую фольгу; сканирование этим пучком позволяет облучать в одном процессе большое количество приборов одновременно и быстро менять облучаемые объекты.

Однако однородное распределение концентрации рекомбинационных центров и, следовательно, времени жизни носителей  $\tau$  вдоль оси прибора во многих случаях не является оптимальным. Так, например, высоковольтные мощные  $p^+Nn^+$ -диоды, включаемые встречно-параллельно приборам ключевого типа (тиристорам либо транзисторам) практически во всех преобразователях электроэнергии, должны иметь малое остаточное напряжение в проводящем состоянии  $U_f$  и малые коммутационные потери при переходе в запертое состояние. Эти требования взаимно противоречивы. Для получения малого  $U_f$  вся  $N$ -область прибора должна быть заполнена электронно-дырочной плазмой с высокой концентрацией, для чего необходимо иметь высокое  $\tau$  во всей этой области, но длительный процесс удаления этой плазмы при переходе в запертое состояние приводит к большим коммутационным потерям.

Наиболее эффективным в настоящее время оказалось компромиссное решение, предложенное в [2–4] и др., которое стало, в частности основой промышленной технологии производства так называемых быстрых диодов с мягким восстановлением [5]. Было предложено резко уменьшить  $\tau$  в прилегающей к  $p^+$ -инжектору области  $N$ -области протонами либо  $\alpha$ -частицами с энергией, обеспечивающей максимум дефектообразования сразу за  $p^+N$ -переходом. Варьируя дозу облучения, можно создавать в этой области концентрацию рекомбинационных центров существенно большую, чем в остальной части  $N$ -базы. Процесс дефектообразования в кремнии при облучении легкими ионами детально исследован (см., например, монографию [6] и ссылки в ней). Максимум концентрации дефектов образуется в конце тормозного пути, длина которого определяется энергией ионов; например, облучение кремния протонами с энергией  $E$  в диапазоне от 10 keV до 10 MeV обеспечивает возможность создания локальных областей с высокой концентрацией рекомбинационных центров на глубине от 0.15 до 700  $\mu\text{m}$ . Ширина области с высокой концентрацией дефектов возрастает с ростом энергии протонов и составляет, например,  $\sim 1 \mu\text{m}$  при  $E = 320 \text{ keV}$  и  $\sim 20 \mu\text{m}$  при  $E = 3.2 \text{ MeV}$ . На рис. 1 схематически показана форма распределения концентрации электронно-дырочной плазмы в  $N$ -базе диода в случае однородного распределения рекомбинационных центров, полученного облучением MeV-ным электронным пучком (кривая 1), и в случае дополнительного облучения протонами либо  $\alpha$ -частицами со стороны  $p^+N$ -перехода (кривая 2).

Характер процесса перехода диода из проводящего в запертое состояние определяется начальной формой распределения плазмы в



**Рис. 1.** Распределение электронно-дырочной плазмы: 1 — при протекании прямого тока в  $N$ -базе диода с однородным распределением рекомбинационных центров; 2 — при увеличенной концентрации рекомбинационных центров в области  $\Delta$  у  $p^+N$ -перехода путем облучения протонами или  $\alpha$ -частицами.

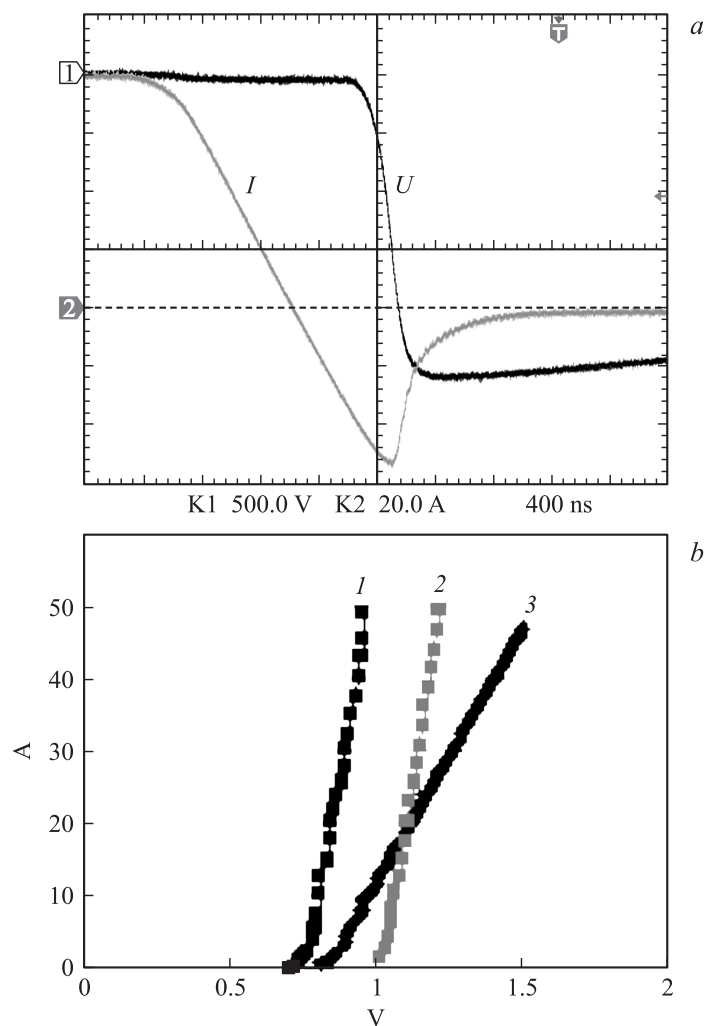
$N$ -базе. При приложении к  $p^+Nn^+$ -переходу обратного напряжения протекание тока сопровождается выносом из плазмы дырок через  $p^+N$ - и электронов через  $n^+N$ -переходы. Когда концентрация дырок у  $p^+N$ -перехода спадает до равновесной, там начинается формирование области объемного заряда ( $W_{SCR}$ ), граница которой перемещается в  $N$ -базу, сопротивление диода нарастает, а ток через него уменьшается. Пока у движущейся границы  $W_{SCR}$  сохраняется плазма, обратный ток  $I_{rev.}$  контролируется выносом из нее дырок. Если начальная концентрация плазмы у  $p^+N$ -перехода высокая (рис. 1, кривая 1), то  $I_{rev.}$  нарастает до большой величины и медленно спадает по мере перемещения границы  $W_{SCR}$ ; такой характер процесса, естественно, сопровождается большим тепловыделением. При малой концентрации плазмы у  $p^+N$ -перехода (кривая 2)  $I_{rev.}$  при той же скорости нарастания  $dI_{rev.}/dt$  нарастает до значительно меньшей величины и начинает спадать очень быстро, но потом скорость его спада резко замедляется по мере вхождения границы  $W_{SCR}$  в область с большой концентрацией плазмы. Приборы с таким начальным распределением плазмы имеют значительно меньшие суммарные потери по сравнению с

обычными выпрямительными диодами и поэтому широко применяются в преобразовательной технике.

Однако необходимость использования облучения протонами значительно удорожает технологию приборов и затрудняет их производство в больших масштабах, так как проводится только в вакууме. В настоящей работе мы показали возможность создания профильного распределения концентрации рекомбинационных центров в высоковольтных кремниевых  $p^+Nn^+$ -диодах путем обычного электронного облучения в определенном диапазоне энергий. В работе [7] было показано, что скорость введения А-центров  $V_A$  при облучении кремния электронами с энергией  $E > 600 \text{ keV}$  практически не зависит от энергии, а при  $E < 600 \text{ keV}$  быстро уменьшается и при  $E < 300 \text{ keV}$  становится пренебрежимо малой.

Поскольку средняя потеря энергии электронов в кремнии составляет  $\sim 0.4 \text{ keV}/\mu\text{m}$ , то при облучении толстой пластины кремния электронами с энергией, например,  $550 \text{ keV}$  область дефектообразования будет иметь толщину  $\sim 500 \mu\text{m}$ , причем концентрация дефектов будет падать очень резко по мере удаления от облучаемой поверхности. Это дает возможность в  $p^+Nn^+$ -структуре при облучении со стороны  $p^+N$ -перехода создать около него в  $N$ -базе узкую область с очень малым временем жизни носителей  $\tau$ , сохранив его достаточно высоким в остальной части  $N$ -базы. При необходимости оно может быть снижено дополнительным коротким облучением электронами с энергией в единицы  $\text{MeV}$ . Реальные перспективы этот метод имеет, конечно, для высоковольтных приборов с толщиной  $N$ -базы в сотни микрон, когда есть возможность работать с энергией  $500 \text{ keV}$  и выше, создавая высокую концентрацию рекомбинационных центров у  $p^+N$ -перехода при достаточно малой дозе, т.е. за приемлемое время работы ускорителя.

В качестве примера на рис. 2, *a* приведены осциллограммы процесса восстановления (*a*) и прямые  $I$ – $V$ -характеристики (*b*) диодной  $p^+Nn^+$ -структуры с блокируемым напряжением  $3.3 \text{ kV}$  и рабочей площадью  $0.5 \text{ cm}^2$ . Структуры выполнены по планарной технологии на кремнии с  $\rho = 150 \Omega \cdot \text{cm}$ , толщина  $N$ -базы  $350 \mu\text{m}$ , глубина  $p^+$ -слоя —  $10 \mu\text{m}$ ,  $n^+$ -слоя —  $15 \mu\text{m}$ , исходное  $\tau$  перед облучением  $60 \mu\text{s}$ , доза облучения  $12 \cdot 10^{16} \text{ cm}^2$ . После облучения время жизни  $\tau$ , измеренное методом Лэкса, у  $p^+N$ -перехода составляло  $1.0 \mu\text{s}$ , а у  $n^+N$ -перехода —  $15 \mu\text{s}$ . Осциллограмма обратного тока имеет „классическую“ форму, характерную для диодов с зоной повышенной рекомбинации у



**Рис. 2.** *a* — осциллограмма процесса восстановления облученного диода при переключении из прямого смещения на обратное.  $I$  — ток,  $U$  — напряжение. Амплитуда прямого тока 80 А, обратного тока 56 А,  $dI_{rev.}/dt = 150 \text{ A}/\mu\text{s}$ . *b* — прямые вольт-амперные характеристики: 1 — необлученного диода (измеренные при 25°C), 2 — облученного диода (измеренные при 25°C), 3 — облученного диода (измеренные при 80°C).

$p^+N$ -перехода: при амплитуде прямого тока 80 А и  $dI_{rev.}/dt = 150 \text{ A}/\mu\text{s}$  амплитуда  $I_{rev.} = 56 \text{ A}$ , спад  $I_{rev.}$  сначала происходит очень резко, а затем замедляется; длительность импульса  $I_{rev.}$  до начала медленной части составляет 600 ns, а по полувысоте 400 ns.

Прямая  $I-V$ -характеристика диода до и после облучения приведена на рис. 2, *b*. Как и следовало ожидать, облучение приводит к возрастанию как напряжения отсечки, так и динамического сопротивления. Это увеличение, однако, относительно невелико, и в целом остаточное напряжение имеет величину, вполне допустимую для столь высоковольтных приборов. Следует особенно отметить четко выраженный положительный коэффициент температурной зависимости  $I-V$ -характеристики, что принципиально необходимо для параллельной работы диодов в мощных силовых модулях.

## Список литературы

- [1] Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. // Физические величины: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 1170.
- [2] Hazdra P., Vobesky J., Brand K. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. B. 2002. V. 186. P. 414–418.
- [3] Hazdra P. et al. // Solid State Phenomena. 2004. V. 95–96. P. 387–392.
- [4] Siemieniec R., Lutz J. // Microelectronics J. 2004. V. 35. P. 259–267.
- [5] Колпаков А. // Электронные компоненты. 2005. № 2. С. 109–113.
- [6] Козловский В.В. // Модифицирование полупроводников пучками протонов. СПб.: Наука, 2003.
- [7] Берман Л.С., Витовский Н.А., Ломасов В.Н., Ткаченко В.Н. // ФТП. 1990. Т. 24. В. 12. С. 2186–2190.