Изв. АН Армянской ССР, Физика, 15, 118—122 (1980)

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ СРЕДНИХ ЭНЕРГИЙ НА СВОЙСТВА КРЕМНИЕВЫХ *p-n*-СТРУКТУР

Ю. А. АБРАМЯН, Г. М. АВАКЬЯНЦ, А. А. АРАКЕЛЯН, Р. Г. СИМОНЯН, С. А. ТАРУМЯН

Исследовано влияние электронов с энергией 8÷20 кэВ на свойства изготовленных диодов. Максимальная величина КПД при возбуждении светом составляет 8,5%, а в случае электронной бомбардировки — 3%. Качественно объясняются результаты измерений.

Полупроводниковые датчики радиационного излучения в настоящее время находят самое широкое практическое применение. В особенности следует отметить применение полупроводниковой мишени с электронной бомбардировкой для создания широкополосных усилителей и мощных ЛБВ (лампа бегущей волны) с модуляцией [1, 2]. С этой точки зрения приобретает важное значение поиск и разработка быстродействующих и высокочувствительных к электронному потоку полупроводниковых элементов, сочетающих в себе простую технологию и надежность.

Одним из возможных вариантов решения такой задачи является применение для этих целей структур с *p-n*-переходами, расположенными очень близко к поверхности кристалла. Однако известно, что влияние поверхностной рекомбинации (снижающее чувствительность) тем больше, чем глубже расположен *p-n*-переход, а также чем ближе к поверхности генерируются носители тока. Поэтому для получения большого сигнала при действии электронного потока желательно *p-n*-переход изготовить близко к поверхности.

При этом очень близкое расположение перехода к поверхности (менее одного мкм) затрудняет осуществление надежного контакта к диффузионному слою вследствие опасности короткого замыкания, а также возможного разрушения контакта при электронной бомбардировке. С другой стороны, достаточно глубокий переход снижает чувствительность из-за рекомбинации носителей в объеме полупроводника.

В настоящей работе дается описание выбранной нами технологии изготовления планарных *p-n*-структур с использованием некоторых простых технологических методов и приводятся результаты исследования характеристик полученных структур под действием светового и электронного потоков.

Из монокристалла кремния *n*-типа ($\rho = 20$ Ом·см) вырезаются пластины диаметром 35 мм и толщиной $d = 500$ мкм. После тщательной промывки, шлифования, механической (либо химической) полировки и последующей промывки пластины с исходной толщиной $d = 300$ мкм помещаются в термостат для сушки ($t = 100°C$). Для проведения последующей операции — диффузии — в керамическую (либо кварцевую) кассету насы-

пается тонкий слой порошка окиси бора (ОСЧ) и медленно (в течение 7÷10 мин) кассета вместе с B_2O_3 вводится в зону печи, нагретую до 1200°С, и после шестичасового отжига при этой температуре используется как источник для многократной диффузии бора.

Кристаллы, приготовленные для диффузии, помещаются в аналогичную кассету, сверху накрываются кассетой с приготовленным диффузантом (расстояние между диффузантом и кристаллом — 8÷10 мм) и вводятся в зону печи при $t = 1100$°С. Диффузионный отжиг длится 40 мин. Исследования показали, что при таком методе диффузии поверхностная концентрация близка к предельной растворимости и равномерна по поверхности. Фронты переходов вдоль всего кристалла для полированных поверхностей также равномерны.

После диффузии кристаллы переносятся в раствор (H_2O — 3 части, HNO_3 — 1 часть, H_2SO_4 — 1 часть, HCl — 1 часть) для снятия боросиликатного стекла. Кипятят в указанном растворе 15 мин, тщательно промывают, высушивают и переносят в печь при 1200°С для окисления. Режим окисления: 10 мин в сухом кислороде, 20 мин во влажном и вновь 10 мин в сухом потоке (расход кислорода по ротаметру — 100 л/час).

После завершения процесса окисления с одной стороны пластин снимается диффузионный слой путем шлифования и после последующей промывки и сушки посредством фотолитографии снимается окисная пленка на контактных кольцах диффузионного слоя. Нанесение металлического контакта на диффузионный слой (контактные кольца) проводится путем химического осаждения никеля из раствора следующего состава: никель хлористый — 30 г/л, гипофосфит натрия — 10 г/л, аммоний лимонокислый (двухзамещенный) — 100 г/л и аммоний хлористый — 50 г/л. Указанный раствор в количестве 200 мл наливается в стакан, ставится на плиту и нагревается до кипения. В начальной стадии кипения в него добавляется 20 мл HN_4OH, и лишь после последующей двухминутной выдержки в раствор опускаются кристаллы. Процесс никелирования в таком кипящем растворе длится 3÷4 мин.

Только при указанной последовательности удается получить никелиевые контакты с хорошей адгезией к полированной поверхности. Далее проводится вжигание никеля в вакууме $10^{-4} \div 10^{-5}$ Торр при $t = 700$°С в течение 10÷15 мин, затем осаждается второй слой никеля по приведенной технологии и проводится вжигание при $t = 200$°С в течение 24 час. После отжига кристаллы нарезаются на отдельные элементы (2,5×2,5 мм²), обезжириваются в четыреххлористом углероде, промываются в горячей воде, высушиваются и затем посредством безкислотного флюса и припоя ПОС-61 под микроскопом напаиваются контакты.

На полученных элементах (глубина p-n-перехода $x = 3$ мкм) вначале нами были сняты световые характеристики с помощью калиброванного светодиода Al 107Б (длина волны излучения 0,9÷1,2 мкм). На рис. 1*а*, 2*а* и 3*а* приведены зависимости тока короткого замыкания, напряжения холостого хода и КПД изготовленных структур от мощности падающего излучения. Чувствительность, определяемая как отношение тока короткого замыкания к мощности падающего излучения, есть $S = 0{,}37$ А/Вт, а

времена восстановления (фронты) в вентильном режиме $\sim (7 \div 8) \cdot 10^{-7}$ сек. Затем нами измерялись те же характеристики (рис. 1*б*, 2*б* и 3*б*), но при бомбаодировке электронами средних энергий (8÷20 кэВ).

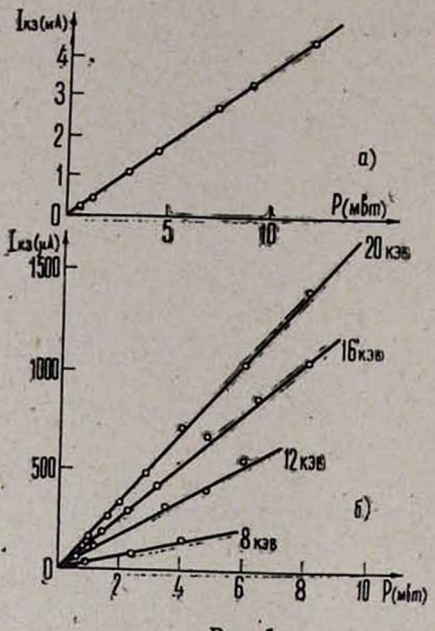

Рис. 1.

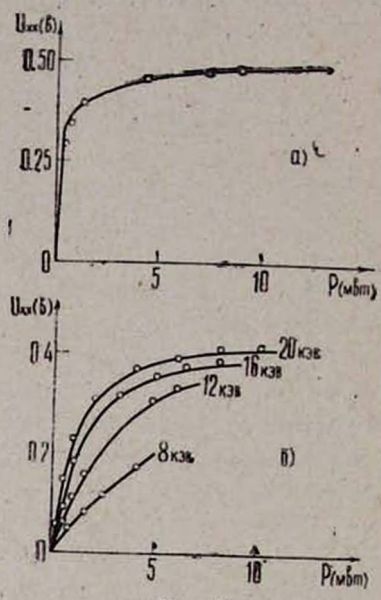

Рис. 2.

Рис. 1. Зависимость тока короткого замыкания диодов: *а*) от падающей световой мощности; *б*) от мощности падающих электронов при разных энергиях.

Рис. 2. Зависимость напряжения холостого хода: *а*) от падающей световой мощности; *б*) от мощности падающих электронов при разных энергиях.

Как было указано выше, чем ближе к поверхности полупроводника генерируются электронно-дырочные пары, тем сильнее влияние поверхности. При облучении электронами указанных энергий электронно-дырочные пары в кремнии образуются в приповерхностном слое толщиной 1÷2 мкм. Следовательно, влияние поверхности на характеристики приборов в этом случае должно быть больше, чем при генерировании пар светом, глубина проникновения которого в кремний порядка десяти мкм для вышеуказанной длины волны.

Следует указать также, что хотя проникший в пластину электрон в основном теряет энергию на образование электронно-дырочных пар, но в то же время энергия, затрачиваемая на создание одной пары, в 3,1 раза больше, чем это требуется в случае генерации пар квантами света с энергией, равной примерно ширине запрещенной зоны кремния (значительная часть энергии электрона — 3,5 эВ — уходит на разгон частиц пары). Кроме того некоторая часть электронов отражается или вызывает образование вторичных электронов и мягкого рентгеновского излучения. Указанные факторы должны заметно ухудшить характеристики элементов при электронной бомбардировке по сравнению со световой.

На рис. 1*б* представлена зависимость тока короткого замыкания от падающей мощности электронов. Из рисунка видно, что с увеличением энергии ток короткого замыкания при данной мощности возрастает довольно сильно. Так как при данной падающей мощности пучка число образованных электронно-дырочных пар не зависит от энергии первичных электронов, то это явление можно объяснить поглощением некоторой доли энергии падающих частиц так называемым «мертвым» слоем [3]. С увеличением энергии падающих электронов глубина их проникновения в кремний увеличивается и все большая часть мощности поглощается вне мертвого слоя и, следовательно, возрастает число образованных электронно-дырочных пар, приводящих к увеличению тока короткого замыкания при данной падающей мощности.

На рис. 2*б* представлена зависимость напряжения холостого хода U_{xx} от падающей мощности электронов при различных энергиях пучка. Здесь также имеет место рост U_{xx} с энергией электронов, который обусловлен той же причиной, что и изменение $I_{кз}$. Следует отметить, что «запаздывание» в наступлении насыщения в зависимости U_{xx} от мощности при электронной бомбардировке по сравнению со световым возбуждением можно объяснить влиянием того же «мертвого» слоя. Действительно, из рисунка видно, что при увеличении энергии падающих электронов кривая $U_{xx} = U_{xx}(P)$ смещается влево. Из сравнения рис. 2*а* и 2*б* видно, что предел насыщения в случае возбуждения светом несколько выше, чем при облучении электронами.

Качественные исследования показали, что с дальнейшим увеличением энергии электронов эта разница уменьшается, но не исчезает. Но, с другой стороны, было замечено, что при больших мощностях и энергиях пучка предельное значение U_{xx} со временем несколько уменьшается. При облучении светом такой же мощности уменьшение U_{xx} практически не обнаруживается. Это явление, по-видимому, объясняется тем, что электронный пучок сильнее, чем свет, влияет на свойства поверхности и, в частности, на скорость поверхностной рекомбинации. Действительно, при воздействии пучка электронов становится заметным изменение поверхностных свойств за счет образования дополнительных поверхностных глубоких уровней [4], хотя при этом величина энергии падающих частиц много меньше порогового зна-

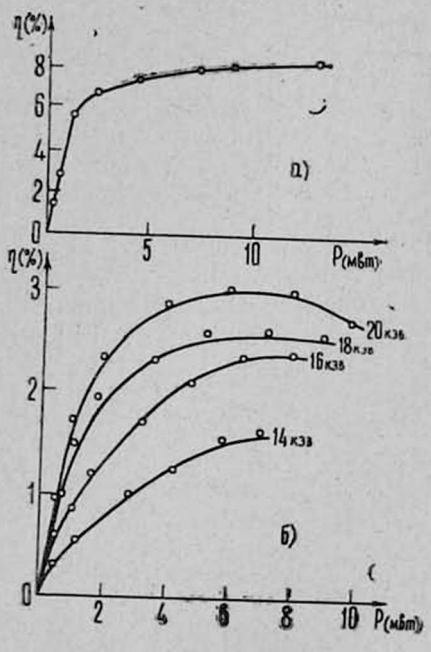

Рис. 3. Зависимость КПД диодов:
а) от падающей световой мощности;
б) от мощности падающих электронов при разных энергиях.

чения образования дефектов в толще кремния. Для установления новой скорости поверхностной рекомбинации требуется конечное время. Это время проявляется в том, что формирование U_{xx} происходит не мгновенно.

На рис. *3б* представлена зависимость КПД элементов от падающей мощности пучка при разных энергиях электронов. При измерении КПД мы исходили из того, что наибольшая мощность выделяется на нагрузке в случае равенства сопротивления нагрузки внутреннему сопротивлению источника. Такое согласование достигалось подбором внешнего сопротивления, при подключении которого в цепь U_{xx} уменьшалось в два раза.

Из рис. *3б* видно, что при больших энергиях и мощностях пучка КПД уменьшается. Тот факт, что при тех же мощностях для света (рис. *3а*) КПД не уменьшается, как нам кажется, свидетельствует о том, что электроны в отличие от света меняют скорость поверхностной рекомбинации и в данном конкретном случае увеличивают ее. В пользу такого объяснения, по-видимому, свидетельствует и то, что при одних и тех же мощностях падающего пучка с увеличением энергии электронов КПД уменьшается сильнее.

В заключение отметим, что рассматриваемые структуры в силу значительного КПД при воздействии электронов могут найти широкое применение в различных устройствах, использующих электронные пучки.

Институт радиофизики
и электроники АН АрмССР

Поступила 8.VI.1979

ЛИТЕРАТУРА

1. *А. Силуарс, Д. Дж. Бейтс, А. Баллокоф.* ТИИЭР, 62, 93 (1974).
2. *B. W. Bell, R. I. Knight.* IEEE Conference Record of 12-th Modulator Symposium, New York City, Febr. 4—5 (1976).
3. *В. С. Вавилов.* Действие излучений на полупроводники, Изд. Физматгиз, М., 1963, стр. 132.
4. *Г. Д. Каплан, В. М. Колешко, Л. П. Гурский.* Микроэлектроника, 5, 359 (1976).

ՄԻՋԻՆ ԷՆԵՐԳԻԱՆԵՐՈՎ ԷԼԵԿՏՐՈՆՆԵՐԻ ԱԶԴԵՑՈՒԹՅՈՒՆԸ ՍԻԼԻՑԻՈՒՄԱՅԻՆ *p–n*–ԿԱՌՈՒՑՎԱԾՔՆԵՐԻ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ՎՐԱ

Յու. Ա. ԱԲՐԱՀԱՄՅԱՆ, Գ. Մ. ԱՎԱԳՅԱՆՑ, Ա. Ա. ԱՌԱՔԵԼՅԱՆ,
Ռ. Գ. ՍԻՄՈՆՅԱՆ, Ս. Ա. ԹԱՌՈՒՄՅԱՆ

Հետազոտված է 8÷20 կէՎ էներգիայով էլեկտրոնների ազդեցությունը պատրաստված դիոդների հատկությունների վրա։ Լույսով գրգռման ժամանակ ՕԳԳ-ի մաքսիմալ արժեքը հավասար է 8,5%, իսկ էլեկտրոններով ռմբակոծելու դեպքում՝ 3%։ Տրված է չափման արդյունքների որակական բացատրությունը։

THE INFLUENCE OF MEDIUM-ENERGY ELECTRONS ON PROPERTIES OF SILICON *p-n*-STRUCTURES

Yu. A. ABRAAMYAN, G. M. AVAKYANTS, A. A. ARAKELYAN,
R. G. SIMONYAN, S. A. TARUMYAN

The influence of 8 ÷ 20 *keV* electrons on the properties of produced diodes is studied. The maximum value of efficiency under the excitation with light makes 8,5%, while that under the electron excitation is 3,0%. The results of measurements are qualitatively interpreted.