

©1994 г.

ВЛИЯНИЕ ФОТОВОЗБУЖДЕНИЯ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ЭЛЕКТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ КРЕМНИЯ

*С.Н.Болдырев, В.Н.Мордкович, Н.М.Омельяновская,
О.В.Феклисова, Н.А.Ярыкин*

Институт проблем технологии микроэлектроники и особо чистых материалов
Российской академии наук, 142432, Черноголовка, Россия
(Получена 22 марта 1994 г. Принята к печати 12 апреля 1994 г.)

Обнаружено, что дополнительная подсветка во время облучения кремния электронами с энергией 4 МэВ приводит к существенному уменьшению концентрации стабильных вакансионных комплексов, причем влияние фотовозбуждения может распространяться на сотни мкм от освещаемой поверхности. Изменение зарядового состояния подвижных точечных дефектов и кинетики дефектных реакций вследствие избыточной концентрации неосновных носителей заряда рассматриваются как наиболее вероятная причина обнаруженного эффекта.

Практически во всех теоретических моделях, развитых к настоящему времени для описания механизмов дефектообразования при облучении полупроводников высокоэнергетичными частицами, признается, что состояние электронной подсистемы кристалла может оказывать существенное влияние на кинетику образования и перераспределения радиационных дефектов [1,2]. Однако лишь в последние годы появился ряд экспериментальных работ, в которых однозначно показано, что интенсивное фотовозбуждение в процессе имплантации ионов в кристаллы кремния приводит как к количественным, так и к качественным изменениям в свойствах полученных слоев [3-7]. Механизм влияния фотовозбуждения на формирование радиационных дефектов в ионно-имплантированных слоях в настоящее время окончательно не выяснен, что, в частности, связано со сложным характером системы дефектов, образующихся в ионных треках. Поэтому в настоящей работе была предпринята попытка обнаружить влияние фотовозбуждения на дефектообразование во время электронного облучения. С точки зрения интерпретации результатов такие эксперименты представляются более простыми по сравнению со случаем ионной имплантации, так как генерация точечных дефектов при электронной бомбардировке практически однородна по всей толщине образца, а сами дефекты являются, как известно, достаточно простыми структурными образованиями [1].

В настоящей работе использованы две группы образцов. Образцы группы 1 — промышленные пластины кремния марки КЭФ-4.5, которые перед облучением электронами не подвергались никакой дополнительной обработке. Образцы группы 2 были изготовлены на основе промышленных пластин кремния марки КЭФ-20, в которых путем имплантации ионов VF_2^+ формировался мелкий $p^+ - n$ -переход [мелкий по сравнению с характерной глубиной поглощения света, используемого (см. далее) для возбуждения электронной подсистемы полупроводника в процессе электронного облучения]. Облучение электронами с энергией 4 МэВ проводилось на линейном импульсном ускорителе с частотой следования импульсов 400 Гц и длительностью 2.5 мкс, плотность тока в импульсе — $10 \text{ МкА} \cdot \text{см}^{-2}$. Доза облучения во всех экспериментах составляла $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$. Часть образцов во время облучения электронами освещалась нефльтрованным светом ртутной лампы высокого давления. Плотность мощности света на поверхности образца составляла $\sim 50 \text{ мВт} \cdot \text{см}^{-2}$. Температура образцов, принудительно охлаждавшихся во время облучения, не превышала 305 К.

После облучения на лицевой стороне образцов группы 1 формировались путем термического напыления золота диоды Шоттки. Омические контакты с тыльной стороны, а также к p^+ -слою в образцах группы 2 изготавливались путем втирания (Al+Ga)-пасты. Измерения вольт-фарадных характеристик показали, что концентрация свободных носителей заряда однородна по всей исследованной глубине x , не отличается в пределах точности методики от концентрации в исходных пластинах и составляет $1.0 \cdot 10^{15}$ и $2.2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ в образцах групп 1 и 2 соответственно.

Общий вид спектров DLTS, измеренных на облученных в темноте образцах обеих групп, хорошо согласуется с описанным в литературе для аналогичных кристаллов [8], что позволяет идентифицировать дефекты, дающие вклад в этот спектр. Пик $E1$ (рис. 1) соответствует эмиссии электронов с A -центров (комплекс кислород-вакансия), пик $E2$ определяется наличием в области пространственного заряда дважды (отрицательно) заряженных дивакансий. Эмиссия электронов из однократно заряженных дивакансий и E -центров (комплекс фосфор-вакансия) формирует пик $E4$. Происхождение пика $E3$ окончательно не установлено [9].

Основной результат работы состоит в том, что фотовозбуждение во время облучения электронами уменьшает количество всех регистрируемых методом DLTS радиационных дефектов, вносящих глубокие уровни в запрещенную зону (рис. 1). Особенно ярко этот эффект проявлялся в образцах группы 2, в которых концентрация A -центров и дивакансий уменьшалась в 8–14 раз (рис. 1, b). Проведенные на $p^+ - n$ -переходах измерения спектров DLTS с использованием инжектирующего заполняющего импульса показали, что амплитуда пика, связываемого с K -центрами, также уменьшается в 5–6 раз. Профилирование путем изменения обратного смещения на $p^+ - n$ -переходе показало, что хотя концентрация радиационных дефектов обнаруживает некоторый спад к границе $p^+ - n$ -перехода, заметного изменения соотношения их концентраций в образцах, облученных на свету и в темноте, не наблюдается на глубинах до $x \simeq 10 \text{ мкм}$. Более того, измерения на дио-

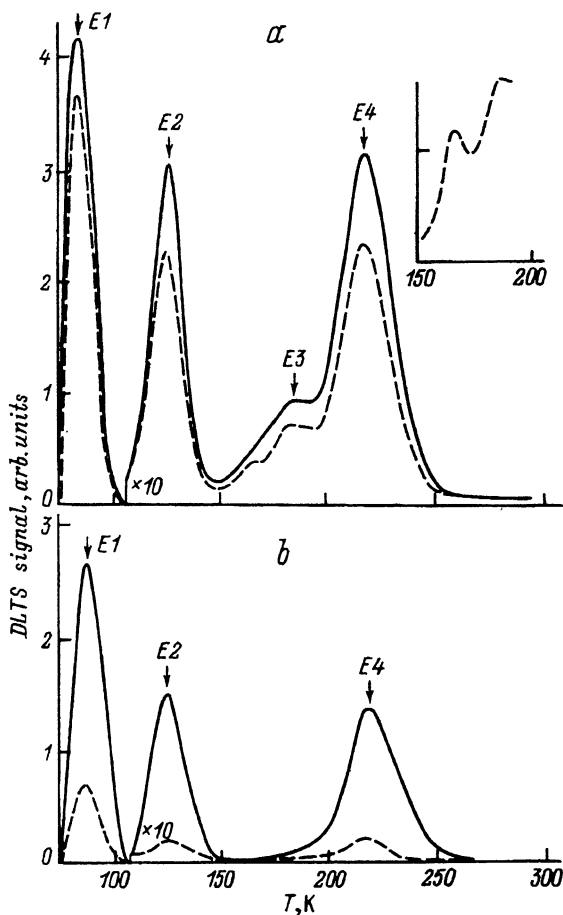


Рис. 1. Кривые DLTS, измеренные на образцах группы 1 (а) и 2 (б), облученных в темноте (сплошная линия) и на свету (штриховая). Условия регистрации спектров: постоянное обратное смещение 2В, амплитуда заполняющих импульсов 2.8В (а) и 2В (б), частота следования импульсов 160 Гц. Вклад в сигнал дают центры, локализованные в приповерхностном слое толщиной 1.7мкм (а) и на глубине 1.8–3.2мкм (б). На вставке (а) — пик $E3$.

дах Шоттки, сформированных на тыльных сторонах пластин группы 2 (после удаления слоя около 15 мкм химическим травлением), выявили приблизительно то же соотношение концентраций. Таким образом, влияние фотовозбуждения в образцах группы 2 распространялось на всю толщину пластины (380 мкм).

Эффект подавления накопления стабильных радиационных дефектов при освещении в образцах группы 1 проявлялся значительно слабее. Из рис. 2 видно, что фотовозбуждение сказывается на концентрации дивакансий N только в приповерхностном слое толщиной ~ 2.5 мкм, а заметного уменьшения концентрации А-центров (которое следует из рис. 1, а) вообще не обнаружено в слоях глубже ~ 1.2 мкм. Отметим также, что в образцах, облучавшихся в условиях фотовозбуждения, хорошо проявляется сложная структура пика $E3$ (вставка на рис. 1, а).

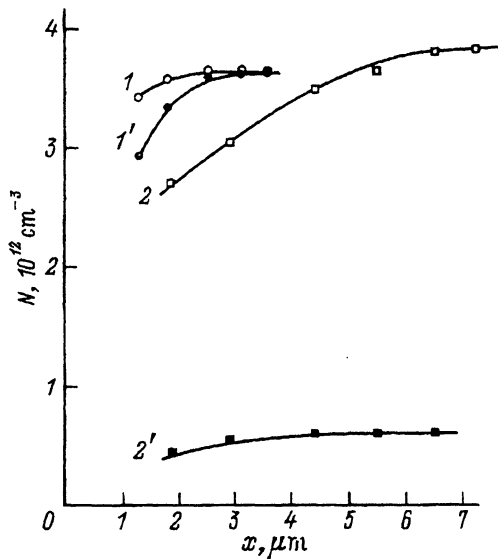


Рис. 2. Профиль распределения центров E_2 (дивакансии) в образцах групп 1 (1, 1') и 2 (2, 2'), облученных в темноте (1, 2) и на свете (1', 2').

Переходя к обсуждению полученных результатов, прежде всего отметим, что спектр и концентрация радиационных дефектов, по крайней мере имеющих уровни в верхней половине запрещенной зоны, практически совпадают в образцах групп 1 и 2, облученных в темноте (рис. 2). Таким образом, ни различия в концентрации основных носителей заряда (в ~ 5 раз), ни возможно различный примесный состав по газообразующим примесям, ни термообработка в процессе создания приповерхностного $p-n$ -перехода не оказывают заметного влияния на аккумуляцию радиационных дефектов. В то же время влияние подсветки обнаруживает гигантское количественное различие в двух группах образцов.

Тот факт, что отмеченное выше подавление дефектообразования светом наблюдается в образцах группы 2 по всей толщине пластины, однозначно свидетельствует о том, что действие света является не прямым, а опосредованным. Действительно, большая часть мощности излучается ртутной лампой в ультрафиолетовой части спектра. Глубина поглощения такого света в кремнии не превышает $\sim 0.2 \mu\text{m}$. Поэтому и эффект прямого действия света не может простирается на большие глубины. В то же время неравновесные носители заряда, обладая диффузионной длиной, сравнимой с толщиной образца, могут существовать на значительных расстояниях от освещаемой поверхности и сдвигать динамическое равновесие между различными зарядовыми состояниями как первичных точечных дефектов, образующихся при облучении электронами, так и их комплексов. Это в свою очередь может приводить к изменению зарядового состояния реагирующих частиц, их подвижности и кинетики дефектных реакций и в конечном счете к наблюдаемому уменьшению числа электрически активных вакансионных комплексов.

Таким образом, различие во влиянии подсветки в двух группах образцов может быть объяснено различной концентрацией неосновных носителей заряда, устанавливающейся при освещении. Легко понять, что пространственное распределение дырок за пределами области по-

глощения света определяется единственным параметром — их диффузионной длиной, которая в исходных пластинах превышала 100 мкм. Поэтому концентрация неосновных носителей заряда мало изменялась по глубине пластин, однако ее значение в основном определялось условиями рекомбинации в приповерхностной области, которые существенно отличаются в образцах групп 1 и 2. Что же касается приповерхностных концентрационных профилей с характерной длиной около 1 мкм, которые наблюдаются и в образцах, облученных в темноте (рис. 2), то они определяются, по-видимому, стоком дефектов на поверхность [10]. Действие света в этом случае также может быть связано с изменением подвижности и зарядового состояния дефектов.

Список литературы

- [1] В.С. Вавилов, А.Е. Кив, О.Р. Ниязова. *Механизмы образования и миграции дефектов в полупроводниках* (М., Наука, 1981).
- [2] Т.В. Машовец. *Чтения памяти А.Ф. Иоффе* (М., Наука, 1986).
- [3] М.К. Шейнкман. Письма ЖТФ, 9, 278 (1982).
- [4] Ю.Н. Ерохин, А.Г. Итальянцев, В.Н. Мордкович. Письма ЖТФ, 14, 835 (1988).
- [5] А.Б. Данилин, Ю.Н. Ерохин, В.Н. Мордкович. Письма ЖТФ, 15, 1 (1989).
- [6] A.B. Danilin, Yu.N. Erokhin, V.N. Mordkovich. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **B59/60**, 985 (1991).
- [7] A.B. Danilin, Yu.N. Erokhin, V.N. Mordkovich, N. Hatzopoulos, P.L.F. Hemment. Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res., **B69**, 268 (1992).
- [8] O.O. Awadelkarim, H. Weman, B.G. Svensson, J.L. Lindstrom. J. Appl. Phys., **60**, 1974 (1986).
- [9] B.G. Svensson, B.M. Larsson, K.-H. Ryden. Mater. Sci. Forum, **38-41**, 1211 (1989).
- [10] О.В. Бобрикова, В.Ф. Стась, Н.Н. Герасименко. ФТП, **22**, 1838 (1989).

Редактор Л.В. Шаронова

Effect of photoexcitation on the efficiency of the defect creation under electron irradiation of silicon

S.N. Boldyrev, V.N. Mordkovich, N.M. Omel'yanovskaya, O.V. Feklisova, and N.A. Yarykin

It has been observed that the additional photoexcitation during irradiation of silicon with 4 MeV electrons results in the significant decrease of stable vacancy-related complex concentration. The influence of photoexcitation can extend to some hundred of micrometers from the illuminated surface. The effect is discussed in terms of recharging mobile point defects and changes in the kinetics of defect reactions due to high concentration of minority charge carriers.