

ФИЗИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ МИКРО- И ОПТОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК 621.315.592

О. А. Гудаев, Э. Э. Пауль

(Новосибирск)

ВЛИЯНИЕ ЭКСКЛЮЗИИ НОСИТЕЛЕЙ ТОКА НА ВРЕМЯ РЕЛАКСАЦИИ ФОТОПРОВОДИМОСТИ

Эксклюзия носителей тока в полупроводниковых структурах может привести к существенному уменьшению времени релаксации фотопроводимости. Показано, что разброс свойств p^+-p -контактов, неконтролируемо возникающих в процессе получения образцов пленок PbS, и развивающаяся на них эксклюзия приводят к зависимости величины и времени релаксации фотопроводимости от знака поля.

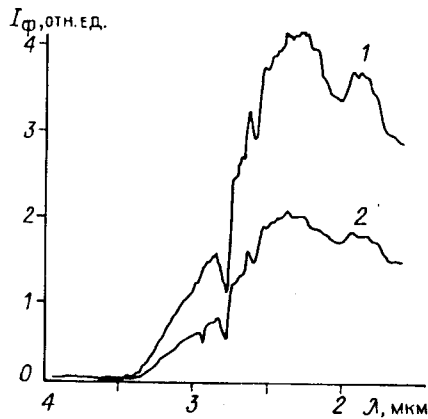
Эксклюзия — явление, возникающее в полупроводниках с неинжектируемыми контактами (n^+-n , p^+-p), изучено существенно слабее, чем, например, инжекция или эффекты вблизи выпрямляющего контакта. Тем не менее показано, что в ряде случаев она может оказать определяющее влияние на протекание тока в полупроводниковых структурах [1, 2].

Тонкие поликристаллические слои сернистого свинца широко используются в настоящее время в ряде приборов в качестве фоточувствительных элементов. Однако до конца не выясненными остаются причины, приводящие к разбросу физических свойств пленок, выращенных, на первый взгляд, в идентичных технологических условиях. В работе показано, что условия на границе электрод — пленка, способствующие возникновению контакта типа p^+-p , могут привести к эксклюзии носителей тока. Это, в свою очередь, может привести к существенному уменьшению времени релаксации фотопроводимости полупроводника.

Экспериментальные результаты. Поликристаллические слои получались методом химического осаждения из раствора на кремниевые подложки с подслоем SiO_2 . Золотые электроды наносились на подложку до осаждения пленки. Размеры фоточувствительных площадок составляли $\sim 50 \times 50$ мкм. Образцы имели планарную геометрию, толщину 0,8 мкм и p -тип проводимости. Концентрация носителей, определенная по эффекту Холла, $\sim (1-3) \cdot 10^{17}$ см $^{-3}$, холловская подвижность ~ 1 см/В · с.

Измерения спектров фоточувствительности, проведенные для ряда образцов пленок PbS, показали, что наблюдается следующий эффект: величина фотопроводимости зависит от знака приложенного к пленке поля, причем при смене знака она может меняться до нескольких раз (см. рисунок). Измерение распределения поля по образцу от электрода до электрода методом светового зонда показало, что выраженных особенностей у контактов нет, перераспределения полей при смене знака поля не происходит.

Оказалось, что изменение фотопроводимости в зависимости от знака приложенного поля обусловлено зависимостью от знака поля времени жизни неравновесных носителей τ . Время жизни носителей τ измеряется по спаду



Спектр фотопроводимости образцов PbS, 180 К:
1 и 2 отличаются знаком поля

фотопроводимости и сильно зависит от температуры. При уменьшении T от комнатной до $\sim 180-160$ К τ экспоненциально увеличивается от $\sim (2-5) \cdot 10^{-5}$ до $(2-5) \cdot 10^{-3}$ с, а далее слабо зависит от температуры. При смене знака, приложенного к образцу поля, τ может изменяться для некоторых образцов до нескольких раз.

Обсуждение. Для того чтобы объяснить полученные результаты, отметим следующее. В ряде работ исследовалось распределение компонент состава химически осажденных пленок PbS по толщине пленки. Было показано, что вблизи поверхностей, т. е. у электродов, наблюдается избыток одной из компонент, в частности серы [4, 5]. Увеличение концентрации серы в пленках PbS приводит к росту концентрации дырок. Таким образом, вблизи электродов могут формироваться контакты типа p^+-p , причем в силу неконтролируемости процесса у разных электродов p^+ -области будут отличаться. Для контактов p^+-p -типа следует ожидать развития эксклюзии неосновных носителей. Зависимость времени релаксации фотопроводимости от знака поля есть одно из проявлений этого явления.

Если скорость генерации неосновных носителей (электронов для PbS) внутри материала и скорость их инжекции через противоположный контакт в сумме меньше скорости удаления их полем, то плотность неосновных носителей в образце уменьшается, т. е. имеет место эксклюзия неосновных носителей. В силу условия электронейтральности концентрация основных носителей (дырок) должна измениться на соответствующую величину. Область обеднения носителями тока при эксклюзии простирается в глубь образца на величину порядка дрейфовой длины $L_n = \mu \tau$. Для характерных для PbS значений параметров μ и τ величина L_n уже при напряжениях на образце ~ 1 В оказывается порядка длины образца. Таким образом, при всех рабочих напряжениях эксклюзия, если она имеет место, охватывает весь образец. В результате при эксклюзии на образцах PbS небольшого размера скачков потенциала у контактов не должно наблюдаться. Совсем другая ситуация наблюдается на образцах, на которых граница электрод — PbS представляет собой выпрямляющий контакт типа Шоттки [3]. В этом случае глубина области обеднения порядка диффузионной длины носителей $L_D = (D\tau)^{1/2}$, $(D = \mu \frac{kT}{e})$ и для PbS составляет $\sim (1 \div 5)$ мкм. Барьеры Шоттки при их возникновении хорошо наблюдаются методом светового зонда [3].

Если для материала p -типа реализуется контакт p^+-p , это приведет к тому, что скорость инжекции электронов через него будет мала и ее можно не учитывать в первом приближении по сравнению со скоростью генерации электронов в зону. Обозначим через n концентрацию электронов после того, как имела место эксклюзия, т. е. n меньше равновесной концентрации n_0 . Тогда скорость генерации электронов равна n_0/τ , скорость их рекомбинации — n/τ , а скорость эксклюзии — n/t , где τ — время жизни неосновных носителей тока — электронов, а t — время их прохождения через образец: $t = L/\mu E$.

При равновесии скорости рекомбинации и эксклюзии в сумме должны быть равны скорости генерации, так что

$$\frac{n_0}{\tau} = \frac{n}{\tau} + \frac{n}{t}, \quad n = n_0 \left(\frac{t}{t + \tau} \right).$$

При $t \ll \tau$ (т. е. $L \ll L_\mu$) получаем $n \ll n_0$, т. е. концентрация неосновных носителей тока изменяется сильно. В отсутствие глубоких ловушек времена жизни основных и неосновных носителей сильно не отличаются. В PbS реализуется этот случай. Тогда изменения концентраций основных ($\Delta p = p_0 - p$) и неосновных ($\Delta n = n_0 - n$) носителей при эксклюзии будут близки: $\Delta n \approx \Delta p$. В этом случае, если даже $\Delta n \approx n_0$, то, учитывая, что материал имеет p -тип проводимости ($n_0 \ll p_0$), получим $\Delta p \ll p_0$, т. е. изменение темновой проводимости будет невелико по сравнению с исходным. Это согласуется с тем, что наблюдается в эксперименте.

По-другому выглядит ситуация для неравновесных фотоносителей. Если мы следим лишь за концентрацией неравновесных носителей, т. е. наблюдаем фототок на переменном сигнале, то для неравновесных электронов и дырок имеем: $\delta n_0/\tau$ — скорость фотогенерации, $\delta n/\tau$ — рекомбинации, $\delta n/t$ — эксклюзии. Однако в этом случае в отличие от равновесных носителей $\delta n_0 \approx \delta p_0$. Если эксклюзия сильная, т. е. $\Delta \delta n_0 \approx \delta n_0$, то $\Delta \delta p_0$ также сравнимо с δp_0 . Таким образом, эксклюзия может оказать сильное влияние на величину фотопроводимости материала при уменьшении концентрации неравновесных носителей. Изменение концентрации неравновесных носителей при эксклюзии происходит в $t/(t + \tau)$ раз в том случае, если выполняется вышеоговоренное условие малости инжекционного тока неосновных носителей через p^+ - p -контакт, т. е. если $j_{nk} \ll j_{n_0}$, где j_{nk} — ток электронов через контакт; j_{n_0} — ток, соответствующий равновесной концентрации в объеме. В том случае, если j_{nk} и j_{n_0} близки, то эксклюзия будет слабой и не превысит величины j_{nk}/j_{n_0} . Тогда развитие эксклюзии ограничивается подтоком неосновных носителей с границы.

Время релаксации фотопроводимости при эксклюзии определяется не τ — временем жизни неравновесных носителей в образце без эксклюзии, а временем пролета носителей через образец t , которое может быть много меньше τ .

Как отмечалось, степень развития эксклюзии сильно зависит от условий вблизи электродов, т. е. от величины тока неосновных носителей в p^+ - p -области. В том случае, если условия на поверхности электрод — пленка в процессе выращивания не контролируются, это может привести к отличающимся по свойствам p^+ - p -контактам даже для одного образца и, как следствие этого, к зависимости величины фотопроводимости и времени релаксации от знака поля.

Таким образом, проведенное рассмотрение показывает, что явление эксклюзии может оказать существенное влияние на параметры фоточувствительных слоев фотоприемных устройств в том случае, если условия на границе электрод — полупроводник способствуют ее развитию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адирович Э. И., Аронов Д. А., Книгин П. И., Королев Ю. С. Эксклюзия в компенсированных полупроводниках с глубокими примесными уровнями // ФТП. — 1974. — 8, вып. 12.
2. Гудаев О. А., Малиновский В. К. Эксклюзия в широкозонных полупроводниках // ФТП. — 1981. — 15, вып. 5.
3. Гудаев О. А., Пауль Э. Э., Седельников А. П. Локальная неоднородность фоточувствительности химически осажденных слоев PbS // Автотметрия. — 1989. — № 5.
4. Верцнер В. Н., Соловьев А. М. Фотозлектрические и оптические явления в полупроводниках. — Киев: АН УССР, 1959.
5. Ковалев А. Н., Маняхин Ф. И., Пархоменко Ю. М., Меньшиков О. Д. Профиль распределения компонентов в приповерхностном слое поликристаллических пленок сульфида свинца // Поверхность. — 1987. — № 11.

Поступила в редакцию 26 июля 1992 г.