

Авторы благодарны В.Н. Андрееву и С.Л. Шохору за измерения электрических параметров пленок, а также И.Л. Шульпиной за проведение рентгеноструктурных исследований.

Л и т е р а т у р а

- [1] S m i t h W.R., R e e d e r T.M., C o l l i n s et al. // IEEE Trans.MTT.1969.V.17.N 11.P.1043-1044.
- [2] N a r i t a M., S a k u m a T., N a k a g a m a T. // J. Appl. Phys. 1987. V. 49. N 11. P.5507-5516.
- [3] E q u i l u s A.G., M a r a d u d i n A.A. // Phys. Rev. B. 1983. V. 28. N 2. P. 728-747.
- [4] S t a n k e F.E., K i n o G.S. // J. Acoust. Soc. Am. 1987. V. 75. N 3. P. 665-681.
- [5] Б а л а ш о в а Е.В., Л е м а н о в В.В., Ш е р м а н А.Б., Т и х о д е е в Ю.С. // Письма в ЖТФ. 1986. Т. 12. В. 6. С. 321-325.
- [6] E w e r t S., G u o S., L e m m e u s P. et al. // Sol. St. Comm. 1987. V. 64. N 8. P. 1153-1156.
- [7] Поверхностные акустические волны / Под ред. А. Олинера, 1981, М.: Мир, с. 390.
- [8] H o r i e Y., F u k a m i T., M o s e S. et al. Sol. St. Comm. 1987. V. 64. N 4. P. 501-504.
- [9] Г о л о в а ш к и н А.И., Д а н и л о в В.А., И в а н е н к о О.М. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1987. Т. 46. В. 7. С. 273-275.

Физико-технический
институт им. А.Ф. Иоффе
АН СССР, Ленинград

Поступило в Редакцию
17 ноября 1988 г.

Письма в ЖТФ, том 15, вып. 1
05.1; 05.2; 06.2; 11

12 января 1989 г.

ТЕНЗОЭЛЕКТРОЭМИССИОННЫЙ ЭФФЕКТ В ТВЕРДЫХ ТЕЛАХ

В.Т. С о т н и к о в, В.А. Г р и ц а н,
А.А. Н е ч е п о р е н к о

В основе известного тензоэлектрического эффекта в полупроводниках лежит взаимодействие между внутренними упругими напряжениями (ВУН) и электрическим сопротивлением, однако об изменении при этом эмиссионных свойств ранее не сообщалось. В данной работе

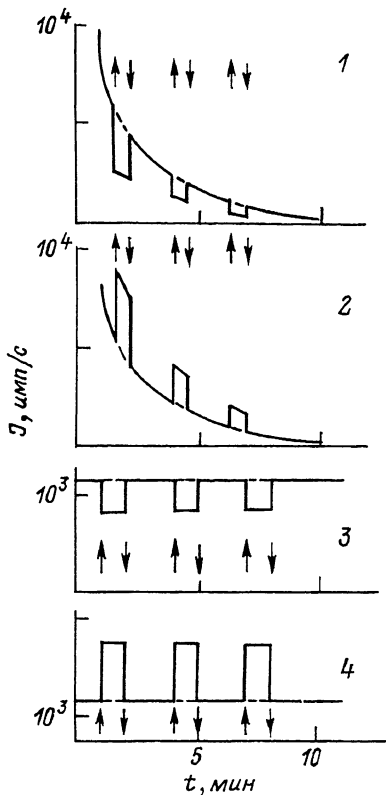
впервые сообщается об эффекте, названном нами тензоэлектроэмиссионным, т.е. изменении эмиссионных свойств твердых тел в электрическом поле, в частности экзoeлектронной и фотоэлектронной эмиссией при изменении ВУН.

Этот эффект мы регистрировали во всех кристаллах A_1B_7 и A_2B_6 , Ge , Si , а также окисленных Al , Cu , Be , Fe и графите. Особенности эффекта, имеющие общий характер, представлены в настоящей работе на примере кристаллов CsJ . Использовались упругонапряженные образцы толщиной 2 мм после резки их по (100) на токарном станке, шлифовки свободным абразивом или наждачной шкуркой, закалки, а также после снятия в них ВУН путем нагрева до 700 К в вакууме и последующего медленного охлаждения (отжиг). Возбуждение образцов осуществлялось при комнатной температуре в течение 10 минут сплошным светом ультрафиолетового излучения от лампы ПРК-4. Скорость нагрева 0.1 и 1 К/с. Кривые затухания экзoeлектронной эмиссии (ЭЭ) (после эмиссии) после возбуждения, фотоэлектронной эмиссии при возбуждении, а также термостимулированной ЭЭ (ТСЭЭ) были получены в режиме счета одиночных импульсов в вакууме 10^{-7} Па. Для воздействия на образцы электрического поля использовалась схема, принятая в методе термостимулированного разряда конденсатора, в которой между тыльной стороной образца и подогревателем располагался через слой слюды плоский металлический электрод, на который от внешнего источника ЭДС подавался отрицательный потенциал -300 В, а заземленная эмиттирующая поверхность образца являлась второй обкладкой конденсатора.

Включение потенциала 300 В положительной полярности всегда сопровождалось уменьшением электронной эмиссии. Изменение полярности потенциала на отрицательную сказывается более сложным образом. На рис. 1 приведены кривые затухания ЭЭ с упругонапряженных (после резки на станке и шлифовки) и отожженных образцов CsJ . В процессе записи кривых производилось включение (\uparrow) и выключение (\downarrow) электрического потенциала -300 В. Видно, что включение поля приводит к скачкообразному уменьшению ЭЭ с упругонапряженных образцов (рис. 1 (1)), но в отожженных образцах действие поля противоположно (рис. 1 (2)).

Известно, что снятие ВУН в твердых телах может быть осуществлено путем их нагрева. Поэтому представлялось интересным влияние электрического поля на ЭЭ при нагреве образцов, т.е. на ТСЭЭ. На рис. 2 приведены спектры ТСЭЭ с упругонапряженного образца. Видно, что включение поля уменьшает интенсивность ТСЭЭ во всем температурном диапазоне, пока не происходит снятия ВУН. Снятие последних сопровождается движением дислокаций и началом пластического течения кристаллов, обуславливающих пик ТСЭЭ при $T \sim 530$ К, ранее идентифицированный нами дислокационной ЭЭ [1]. Действительно, включение поля на участке нарастания этого пика, когда ВУН еще не сняты, сопровождается, как и ранее, резким уменьшением интенсивности ЭЭ (рис. 2 (1)). Однако на участке спада этого пика, когда ВУН уже сняты, действие поля уже

Рис. 1. Кинетические кривые затухания при комнатной температуре экзоэлектронной (1, 2) и фотоэлектронной (3, 4) эмиссий с упругонапряженных (1, 3) и отожженных (2, 4) кристаллов CsJ . \uparrow - включение поля, \downarrow - выключение поля.



противоположно, т.е. оно резко усиливает ЭЭ. В максимуме этого пика напряженного образца при включении поля ЭЭ резко возрастает и тут же резко уменьшается, затем релаксирует к начальному значению, т.е. в максимуме пика происходит изменение характера действия поля на ТСЭЭ от гашения к ее усилению. При более высоких температурах ВУН уже сняты и включение поля усиливает ЭЭ.

Если после записи дислокационного пика сразу выключить нагрев и производить охлаждение с постоянно включенным электрическим полем, то при охлаждении наблюдается еще один интересный эффект - термическая обратимость направления ТСЭЭ [2], проявляющаяся в виде воспроизводимости при охлаждении дислокационного пика ЭЭ вследствие конкуренции двух противоположных процессов - заполнения дислокационного уровня электронами путем их туннельного перехода с глубоких акцепторных уровней (туннельная перезарядка уровней дефектов под действием электрического поля) и повторной делокализации электронов с дислокационного уровня вследствие термостимуляции. Следствием такой конкуренции является не только воспроизводимость дислокационного пика ТСЭЭ при охлаждении, но и одновременное заполнение уровня, соответствующего этому пику, электронами со стороны больших значений энергий активации. После медленного охлаждения образца до комнатной температуры и его возбуждения ультрафиолетовым излучением все пики ТСЭЭ воспроизводятся при повторном нагреве и включение поля усиливает ЭЭ во всем температурном диапазоне от 300 до 700 К.

Важно отметить, что если в области локализации каких-либо дефектов, обуславливающих тот или иной пик ТСЭЭ, возникают в процессе нагрева или уже имеются ВУН, то это легко можно зарегистрировать, используя тензоэлектроэмиссионный эффект. Ранее в [3]

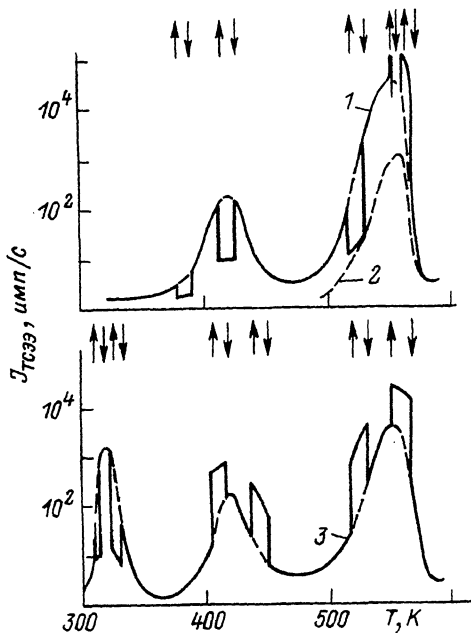


Рис. 2. Спектры ТСЭЭ с упругонапряженных (1) и отожженных (2, 3) кристаллов CsJ . 1, 3 - нагрев с периодическим включением (\uparrow) и выключением (\downarrow) поля, 2 - охлаждение в постоянном электрическом поле. 1, 2 - $\beta = 0.1$ K/c; 3 - $\beta = 1$ K/c.

было показано, что при одностороннем нагреве твердых тел на медном теплопроводе со скоростью ~ 1 K/c в начальный момент нагрева появляется пик электронной эмиссии, обусловленный возникновением в образце термоупругих напряжений. На рис. 2 (3) приведен спектр ТСЭЭ с отожженного образца CsJ при нагреве с $\beta = 1$ K/c с периодическим включением электрического поля. Видно, что в области локализации дефектов, обуславливающих пики при $T \sim 420, 540$ K ВУН нет, а при $T \sim 320$ K они есть, что подтверждает термоупругую природу пика электронной эмиссии при этой температуре.

Природу тензоэлектроэмиссионного эффекта можно объяснить следующим. Известно, что основным видом взаимодействия движущегося электрона с кристаллической решеткой полупроводника или диэлектрика является электрон-фононное, мало изменяющее энергию, но сильно изменяющее импульс. При этом подвижность электронов является функцией не только энергии, но и константы электрон-фононного взаимодействия, которая может быть как больше нуля, так и меньше в зависимости от того, чем определяется основной механизм рассеяния движущегося электрона - рассеянием на деформационном потенциале или рассеянием на пьезопотенциале [4].

Следствием этого, результирующая направленность электронов может быть как в сторону поля, так и против. В упругонапряженных кристаллах рассеяние электронов происходит в основном на деформационном потенциале, в отожженных - на пьезопотенциале, обуславливая противоположное влияние электрического поля на ЭЭ. Из сказанного следует, что природа электрона, участвующего в электрон-фононном взаимодействии с решеткой, не играет определяющей роли в тензоэлектроэмиссионном эффекте, т.е. влияние ВУН будет сказываться не только на ЭЭ, но и на других видах электронных эмиссий, в частности на фотоэлектронной и вторичноэлектронной эмиссиях, имеющих в своем составе компоненту электронов, транспорт которых к эмиттирующей поверхности обусловлен электрон-фононным взаимодействием. Для подтверждения этого на рис. 1(3) и (4) приведены изменения интенсивности фотоэлектронной эмиссии, возникающей при облучении ультрафиолетовым излучением упругонапряженных (рис. 1(3)) и ненапряженных (рис. 1(4)) кристаллов *CSJ* при включении и выключении поля. Видно, что эти изменения имеют одинаковый характер с изменением интенсивности ЭЭ.

В заключение следует отметить, что тензоэлектроэмиссионный эффект представляется перспективным для бесконтактного контроля остаточных ВУН в твердых телах, определения температур снятия ВУН и начала пластического течения кристаллов, динамики изменения ВУН в области локализации центров окраски кристаллов полупроводников и диэлектриков при их радиационном облучении и т.д.

Л и т е р а т у р а

- [1] Сотников В.Т., Старжинский Н.Г., Авотин С.С. // ФТТ. 1985. Т. 27. В. 9. С. 2781-2783.
- [2] Сотников В.Т., Жук В.А., Запечельнюк Э.Ф., Нечепоренко А.А. // УФЖ. 1988. Т. 33. № 6. С. 909-913.
- [3] Сотников В.Т., Грицан В.А., Нечепоренко А.А. // Письма в ЖТФ. 1987. Т. 13. В. 21. С. 1291-1295.
- [4] Бонч-Бруевич В.Л., Калашников С.Г. Физика полупроводников. М.: Наука. 672 с.

Харьковский
авиационный
институт
им. Н.Е. Жуковского

Поступило в Редакцию
17 сентября 1988 г.