

УДК 621.315.592

Радиационное дефектообразование при ионной имплантации бора в эпитаксиальные пленки $Hg_{1-x}Cd_xTe$ различного состава

А. В. Войцеховский, Д. В. Григорьев, А. П. Коханенко, А. Г. Коротаев,
И. И. Ижнин, С. А. Дворецкий, Н. Н. Михайлов

В работе проведено исследование специфики формирования и эволюции электрически активных радиационных дефектов при имплантации ионов бора в эпитаксиальные пленки $Hg_{1-x}Cd_xTe$ с различным составом в области внедрения имплантанта. Эпитаксиальные пленки, выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии, облучались ионами бора с энергией 100 кэВ в диапазоне флюенса 10^{12} — 10^{15} см⁻². Измерение электрофизических параметров образцов до и после облучения производилось методом ЭДС Холла в конфигурации Ван-дер-Пау. Распределение объемной концентрации электронов по глубине облученного материала определялось методом дифференциальных холловских измерений. Полученные экспериментальные данные однозначно показывают, что результаты ионной имплантации определяются зависимостью динамики накопления электрически активных радиационных дефектов и электрофизических свойств материала от состава КРТ.

PACS: 79.20.Rf, 37.20.+j, 73.21.Ac, 73.61Ga

Ключевые слова: теллурид кадмия ртути, эпитаксиальные пленки, имплантация, радиационное дефектообразование, электрофизические параметры.

Введение

В настоящее время гетероэпитаксиальные структуры $Hg_{1-x}Cd_xTe$ (КРТ), выращенные методом молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ), яв-

ляются наиболее перспективным материалом для создания многоэлементных полупроводниковых детекторов ИК-излучения, обеспечивающих обработку сигнала непосредственно в фокальной области [1].

Одним из основных применяемых технологических методов создания фотодиодных структур на основе КРТ является ионная имплантация [2—4]. Для прецизионного контролирования результатов имплантации необходимо глубокое понимание процессов образования и эволюции радиационных дефектов (РД) при ионной имплантации, которые в случае КРТ в конечном итоге определяют все электрофизические параметры облученной области материала [2—10]. Необходимо отметить, что в последнее время особый интерес проявляется к использованию материала со сложным пространственным распределением состава по глубине структуры (варизонные структуры). Так, создание в приповерхностной области варизонного широкозонного слоя значительно уменьшает поверхностную рекомбинацию, что в конечном итоге улучшает чувствительность изготавливаемых фотоприемников [11, 12]. Поэтому актуальным является изучение процессов радиационного дефектообразования при ионной имплантации в КРТ с переменным составом в области внедрения имплантанта.

Войцеховский Александр Васильевич, профессор¹.
Григорьев Денис Валерьевич, доцент¹.
Коханенко Андрей Павлович, профессор¹.
Коротаев Александр Григорьевич, доцент¹.
Ижнин Игорь Иванович, ведущий научный сотрудник².
Дворецкий Сергей Алексеевич, зав. лабораторией³.
Михайлов Николай Николаевич, старший научный сотрудник³.

¹ Томский государственный университет.

Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

Тел. (3822) 413-517.

E-mail: vav43@mail.tsu.ru; denn.grig@mail.tsu.ru;

kokh@mail.tsu.ru; kor@mail.tsu.ru

² НПО «Карат».

Украина, 79031, г. Львов, ул. Стрийская, 202.

Тел. (81038032) 263-10-65.

E-mail: i.izhnin@carat.electron.ua

³ Институт физики полупроводников СО РАН.

Россия, 630090, Новосибирск, пр. Лаврентьева, 13.

Тел. (383) 330-99-23.

E-mail: dvor@isp.nsc.ru; mikhailov@isp.nsc.ru

Статья поступила в редакцию 8 июня 2016 г.

© Войцеховский А. В., Григорьев Д. В., Коханенко А. П.,
Коротаев А. Г., Ижнин И. И., Дворецкий С. А.,
Михайлов Н. Н., 2016

Проведенные авторами первые эксперименты по исследованию влияния облучения ионов аргона и молекулярного азота на электрофизические параметры облученных эпитаксиальных пленок позволили сделать предположение, что наблюдаемые отличия ионной имплантации в гетероэпитаксиальный МЛЭ КРТ, по сравнению с имплантацией в объемные кристаллы КРТ, можно объяснить влиянием приповерхностного варизонного слоя на процессы радиационного дефектообразования [13]. Последующие исследования влияния области переменного состава на результаты ионной имплантации позволили сделать предположение, что основным фактором, определяющим пространственное распределение электрически активных дефектов после ионного внедрения, является зависимость динамики накопления электрически активных РД и электрофизических свойств материала от состава КРТ [14]. Однако прямое экспериментальное доказательство этого предположения отсутствует.

Целью данной работы было получение прямых экспериментальных доказательств влияния состава материала эпитаксиальной пленки КРТ на результаты радиационного дефектообразования при ионной имплантации.

Образцы и методика эксперимента

Для проведения исследований в ИФП СО РАН (г. Новосибирск) были специально выращены эпитаксиальные пленки с различным составом основного рабочего слоя. Пленки выращивались на подложках GaAs ориентации (013) с буферными слоями из ZnTe и CdTe. После выращивания пленки имели n -тип проводимости. Для конвертирования в p -тип их отжигали в нейтральной атмосфере водорода или гелия.

Для экспериментов были подготовлены четыре серии эпитаксиальных пленок (таблица 1). Для образцов серии 4 определение электрофизических параметров не проводилось из-за высоких и неомичных контактных сопротивлений. Облучение ионами бора проводилось при комнатной температуре в непрерывном режиме в диапазоне флюенса 10^{12} — 10^{15} см⁻² и энергией 100 кэВ. Измерения электрофизических параметров образцов до и после облучения проводились при температуре жидкого азота методом ЭДС Холла в конфигурации Ван-дер-Пау.

Распределение концентрации электронов по глубине полупроводника определялось методом дифференциальных холловских измерений. Удаление тонких слоев материала осуществлялось путем химического травления в 0,02%-растворе

брома в диметилформамиде. Скорость травления определялась на спутниковом образце по высоте ступеньки, измеренной на микроскопе МИИ-4 после многократного повторения циклов удаления материала. Ошибка определения проводимости и коэффициента Холла не превышала 2—3 %. Ошибка определения объемной концентрации электронов не превышала 10—12 %.

Таблица 1

Исходные параметры эпитаксиальных структур (d, ρ, μ_p — толщина пленки, концентрация и подвижность дырок соответственно)

Серия, №	Состав, x	ρ, см ⁻³	μ _p , см ² В ⁻¹ с ⁻¹
1	0,22	8,6·10 ¹⁵	554
2	0,3	7,9·10 ¹⁵	372
3	0,38	8,5·10 ¹⁵	235
4	0,57	—	—

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измерения электрофизических параметров образцов после имплантации показало, что облучение ионами бора эпитаксиальных пленок КРТ приводит к конверсии типа проводимости, образованию в приповерхностной области материала высоколегированного n^+ -слоя вследствие генерации в процессе облучения радиационных дефектов (РД), проявляющих донорные свойства [2—10].

Зависимость слоевой концентрации носителей заряда N_S от флюенса облучения представлено на рис. 1.

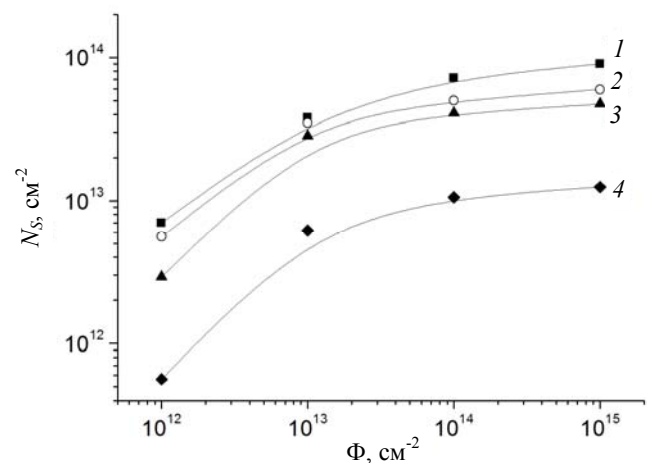


Рис. 1. Зависимость слоевой концентрации электронов N_S от флюенса облучения Φ . Номер кривой соответствует номеру серии образца (табл. 1).

Из рисунка видно, что для всех образцов при увеличении флюенса облучения Φ наблюдается монотонное возрастание зависимости $N_S(\Phi)$. Од-

нако при одной и той же дозе облучения значение N_S для каждой серии образцов отличается и зависит от состава материала в области внедрения имплантанта. Для образцов эпитаксиальных пленок серии 1 наблюдается характерное поведение зависимости $N_S(\Phi)$, которое отмечается при имплантации в объемные кристаллы КРТ состава $x = 0,2$ [2—10]. При достижении флюенса $\Phi_{sat} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ слоевая концентрация достигает максимального значения N_{Smax} , происходит насыщение зависимости слоевой концентрации носителей заряда от флюенса. Однако величина максимального значения N_{Smax} в области насыщения подобной зависимости для каждой серии образцов отличается.

Различное поведение зависимостей электрофизических параметров от флюенса для образцов различных серий можно объяснить тем фактом, что для каждой эпитаксиальной пленки внедрение имплантанта происходит в материал разного состава, т.е. различается соотношение генерируемых первичных РД в металлических подрешетках CdTe и HgTe. С помощью программного комплекса SRIM2003 [15] был проведен расчет полного количества каскадов соударений, возникающих в эпитаксиальных пленках КРТ с различным составом материала в области внедрения ионов бора, который показал, что для образцов серии 4 количество первичных смещений атомов ртути на 60 % меньше, чем для образцов серии 1. Так как количество генерируемых междоузельных атомов ртути уменьшается, то, соответственно, следует ожидать замедления динамики образования вторичных электрически активных дефектов, кинетика накопления которых пропорциональна концентрации первичных РД. Поэтому для образцов различных серий в области флюенса облучения $\Phi < \Phi_{sat}$ различается и скорость введения электрически активных радиационных дефектов $dN_S/d\Phi$. С увеличением состава x скорость введения дефектов уменьшается.

Измерения профилей пространственного распределения объемной концентрации электронов показало, что для образцов всех серий при флюенсе 10^{12} см^{-2} максимально высокая концентрация электронов отмечается в области среднего проецированного пробега R_p ионов бора. Увеличение флюенса облучения до $\Phi_{sat} = 10^{14} \text{ см}^{-2}$ приводит к возрастанию значения в максимуме профиля $n(z)$ вплоть до величины n_{sat} . Дальнейшее увеличение флюенса приводит к сдвигу профиля распределения электрически активных РД вглубь образца, при этом значение в максимуме зависимости $n(z)$ практически не изменяется, т.е. происходит насыщение концентрации электронов. Таким образом, в эксперименте наблюдается картина, которая широко описана в литературе по имплантации B^+ и других ионов в объемный материал КРТ

[2—10]. Однако сравнение профилей распределения объемной концентрации электронов для образцов эпитаксиальных пленок различных серий показало, что величина концентрации электронов в максимуме профиля распределения $n(z)$ для всех исследуемых пленок различается. Причем значение концентрации тем меньше, чем больше состав эпитаксиальной пленки x (см. рис. 2).

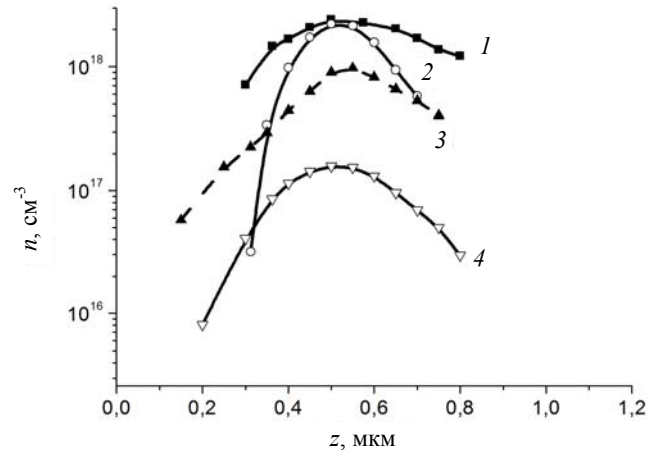


Рис. 2. Распределение объемной концентрации электронов n по глубине z . Номер кривой соответствует номеру серии образца (табл. 1).

Считается, что эффект насыщения электрофизических характеристик облученного материала КРТ обусловлен закреплением уровня Ферми в предельном состоянии F_{lim} , энергетическое положение которого с точностью до kT совпадает с уровнем вводимых радиационных дефектов E_R [14, 16]. Энергетическое положение уровня E_R оценивается $\sim 0,15$ эВ выше дна зоны проводимости. Авторы [18] показали, что высокоэнергетическое облучение полупроводников группы алмаза и бинарных соединений группы АПВВ всегда, независимо от условий облучения и предыстории материала, приводит к закреплению уровня Ферми в предельном состоянии F_{lim} . Было также показано, что стационарное положение уровня Ферми в облученном полупроводнике совпадает с уровнем локальной электронейтральности кристалла $E_{|n|}$, положение которого может быть рассчитано теоретически. В работе [19] подобный подход в описании свойств облученного материала был применен для узкозонных твердых растворов КРТ.

Сопоставление экспериментальных данных [2—14] и теоретического расчета [19] позволяют сделать предположение, что энергетическое положение уровня радиационных дефектов E_R совпадает с положением уровня локальной электронейтральности кристаллической решетки материала $E_{|n|}$ относительно дна зоны проводимости E_C . В рамках данного предположения был проведен расчет энергетического положения стационарного

уровня Ферми F_{lim} и соответствующей ему предельной концентрации электронов n_{lim} в зависимости от состава КРТ. При расчете принималось во внимание результаты работы [19]:

1. энергетическое положение уровня локальной электронейтральности $E_{|n|}$ материала относительно уровня E_C имеет линейную зависимость от состава КРТ;

2. для состава $x = 0,5$ энергетическое положение уровня $E_{|n|}$ совпадает с краем дна зоны проводимости ($E_{|n|} = E_C$);

3. для состава $x = 0,2$ уровень $E_{|n|}$ находится на 0,15 эВ выше дна зоны проводимости E_C , т.е. совпадает с энергетическим положением уровня вводимых РД E_R , определенным из экспериментальных данных [2—14].

Результаты расчета предельной концентрации электронов n_{lim} представлены на рис. 3. На этом же рисунке приведены экспериментальные значения максимальной концентрации электронов в области локализации профиля $n(z)$ в зависимости от состава эпитаксиальной пленки. Как видно, теоретическая кривая удовлетворительно описывает экспериментальные результаты.

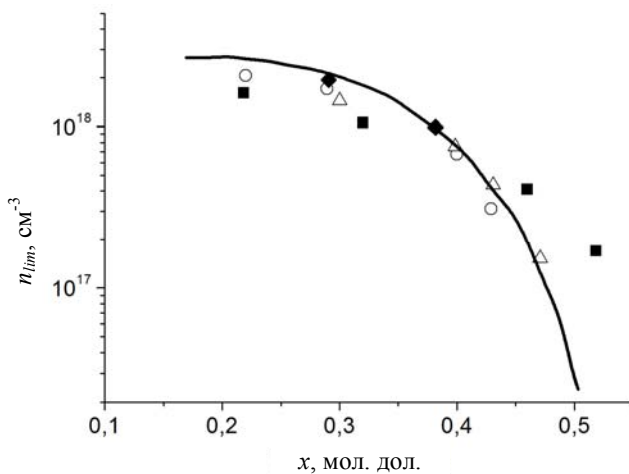


Рис. 3. Зависимость предельной концентрации электронов n_{lim} от состава материала x (сплошная линия). Экспериментальные точки — зависимость объемной концентрации электронов в максимуме $n(z)$ от состава материала эпитаксиальной пленки КРТ.

Заключение

Экспериментальные исследования влияния имплантации ионов бора на электрофизические параметры эпитаксиального материала КРТ, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии, показали, что результаты ионной имплантации определяются зависимостью динамики накопления электрически активных радиационных

дефектов и электрофизических свойств материала от состава КРТ. Полученные в данной работе экспериментальные данные подтверждают достоверность предположения того, что основными РД, определяющими свойства облученного КРТ, являются дефекты в металлической подрешетке HgTe.

В практическом плане полученные результаты могут быть использованы для оптимизации режимов ионной имплантации в МЛЭ КРТ с различным составом рабочего слоя при изготовлении диодных структур.

Исследования проведены при поддержке РФФИ, грант р_а № 16.-42-700759.

ЛИТЕРАТУРА

- Rogalski A. Infrared Detectors — CRC Press, Boca Raton, 2011.
- Ryssel H., Lang G., Biersack J. P., Muller K. and Kruger W. // IEEE Transaction on Electron Devices. 1980. Vol. ED-27. P. 58.
- Destefanis G. L. // Nucl. Instr. Meth. 1983. Vol. 209/210. P. 567.
- Sidorov Yu. G., Dvoretiskii S. A., Mikhailov N. N., Yakushev M. V., Varavin V. S., Vasil'ev V. V., Syslyakov A. O. and Ovsyuk V. U. // Applied Physics. 2000. Vol. 5. P. 108.
- Овсяк В. Н., Курьшев Г. Л., Сидоров Ю. Г. Матричные фотоприемники инфракрасного диапазона. — Новосибирск: Наука, 2001.
- Margalit S., Nemirovsky Y. and Rotstein I. // J. Appl. Phys. 1979. Vol. 50. P. 6386.
- Vodopyanov L. K. and Kozyrev S. P. // Phys. Stat. Sol. 1982. Vol. 72. P. 734.
- Bahir C. and Kalish R. // J. Appl. Phys. 1983. Vol. 54. P. 3129.
- Bubulac L. O., Tennant W. E., Shin S. H., Wang C. C., Lanir M., Gerther E. R. and Marshall E. D. // Japan Appl. Phys. 1980. Vol. 19. P. 495.
- Voitsekhovskii A. V. and Kokhanenko A. P. // Russian Physical Journal. 1998. Vol. 1. P. 101.
- Voitsekhovskii A. V. and Kokhanenko A. P. // Russian Physical Journal. 1998. Vol. 41. P. 44.
- Войцеховский А. В., Денисов Ю. А., Коханенко А. П., Варавин В. С., Дворецкий С. А., Михайлов Н. Н., Сидоров Ю. Г., Якушев М. В. // Автометрия. 1998. Т. 4. С. 47.
- Войцеховский А. В., Григорьев Д. В., Коротаев А. Г., Коханенко А. П., Леонтьев Д. В., Кульчичский Н. А. // Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники. 2004. Т. 2. С. 60.
- Voitsekhovskii A. V., Grigoryev D. V. and Smith R. // Semiconductor Science and Technology. 2008. Vol. 23. P. 055020.
- Ziegler J. F., Biersack J. P. and Littmark U. The Stopping and Range of Ions in Solids. — New York: Pergamon Press, 1985.
- Voitsekhovskii A. V., Kokhanenko A. P., Shulga S. A. and Smith R. // Nucl. Instrum. and Meth. 2004. Vol. B215. P. 109.
- Монастырский Л. С., Соколовский Б. С. // ФТП. 1992. Т. 26. С. 2143.
- Brudnyi V. N., Grinyaev S. N. and Stepanov V. E. // Physica B: Cond. Matter. 1995. Vol. 212. P. 429.
- Brudnyi V. N. and Grinyaev S. N. // Semiconductors. 2001. Vol. 35. P. 784.

Radiation defect formation at boron implantation in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ epitaxial films with different material composition

A. V. Voitsekhovskii¹, D. V. Grigoryev¹, A. P. Kokhanenko¹, A. G. Korotaev¹, I. I. Izhnin²,
S. A. Dvoretiskii³, and N. N. Mikhailov³

¹Tomsk State University
36 Lenin av., Tomsk, 634050, Russia
E-mail: vav43@mail.tsu.ru; denn.grig@mail.tsu.ru; kokh@mail.tsu.ru; kor@mail.tsu.ru

²Scientific-Research Company «CARAT»
202 Stryyska str., Lviv, 79031, Ukraine
E-mail: i.izhnin@carat.electron.ua

³Rzhanov Institute of Semiconductor Physics, SB RAS
13 Lavrentieva av., Novosibirsk, 630090, Russia
E-mail: dvor@isp.nsc.ru; mikhailov@isp.nsc.ru

Received June 8, 2016

The aim of this paper is to investigate the specific properties of the formation and accumulation of the spatial distribution of electrically active radiation defects after B ion implantation in $\text{Hg}_{1-x}\text{Cd}_x\text{Te}$ (MCT) epitaxial films of different material composition (x) in the region of introduction of the implant. The films, grown by molecular beam epitaxy (MBE) were irradiated by B ions at room temperature in the radiation dose range 10^{12} – 10^{15} ions/cm² and with ion energy 100 keV. Measurements of the electro-physical parameters of the samples before and after irradiation were made at the temperature of liquid nitrogen using the Hall Electromotive Force method in the Van-der-Pau configuration. The electron concentration distribution as a function of semiconductor depth was determined by the method of differential Hall measurements using an etching process. The experimental results are shown that the material composition (x) of an epitaxial film significantly effect on boron implantation results and determine both the electrical parameters of the implanted layer, and the spatial distribution of the donor type radiation defects.

PACS: 79.20.Rf, 37.20.+j, 73.21.Ac, 73.61Ga

Keywords: mercury cadmium telluride, epitaxial films, implantation, radiation defect formation, electro-physical properties.

REFERENCES

1. A. Rogalski, *Infrared Detectors* (CRC Press, Boca Raton, 2011).
2. H. Ryssel, G. Lang, J. P. Biersack, K. Muller and W. Kruger, IEEE Transaction on Electron Devices **ED-27**, 58 (1980).
3. G. L. Destefanis, Nucl. Instr. Meth. **209/210**, 567 (1983).
4. Yu. G. Sidorov, S. A. Dvoretiskii, N. N. Mikhailov, M. V. Yakushev, V. S. Varavin, V. V. Vasil'ev, A. O. Syslyakov and V. U. Ovsyuk, Applied Physics **5**, 108 (2000).
5. V. N. Ovsyuk, G. L. Kuryshv and Yu. G. Sidorov, *Matrix photo-receiving devices of IR range* (Novosibirsk: Nauka, 2001) [in Russian].
6. S. Margalit, Y. Nemirovsky and I. Rotstein, J. Appl. Phys. **50**, 6386 (1979).
7. L. K. Vodopyanov and S. P. Kozyrev, Phys. Stat. Sol., **72**, 734 (1982).
8. C. Bahir and R. Kalish, J. Appl. Phys. **54**, 3129 (1983).
9. L. O. Bubulac, W. E. Tennant, S. H. Shin, C. C. Wang, M. Lanir, E. R. Gerther and E. D. Marshall, Japan Appl. Phys. **19**, 495 (1980).
10. A. V. Voitsekhovskii and A. P. Kokhanenko, Russian Physical Journal **1**, 101 (1998).
11. A. V. Voitsekhovskii and A. P. Kokhanenko, Russian Physical Journal **41**, 44 (1998).
12. A. V. Voitsekhovskii, Yu. A. Denisov, A. P. Kokhanenko, V. S. Varavin, S. A. Dvoretiskii, N. N. Mikhailov, Yu. G. Sidorov and M. V. Yakushev // *Autometry* **4**, 47 (1998).
13. A. V. Voitsekhovskii, D. V. Grigoryev, A. G. Korotaev, A. P. Kokhanenko, D. V. Leontiev and N. A. Kul'chitskii, *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Materials of Electron Techniques* **2**, 60 (2004).
14. A.V. Voitsekhovskii, D. V. Grigoryev and R. Smith, *Semiconductor Science and Technology* **23**, 055020 (2008).
15. J. F. Ziegler, J. P. Biersack and U. Littmark, *The Stopping and Range of Ions in Solids* (New York: Pergamon Press, 1985).
16. A. V. Voitsekhovskii, A. P. Kokhanenko, S. A. Shulga and R. Smith, Nucl. Instrum. and Meth. **B215**, 109 (2004).
17. L. S. Monastyrskii and B. S. Sokolovskii, *Semiconductors*. **26**, 2143 (1992).
18. V. N. Brudnyi, S. N. Grinyayev and V. E. Stepanov, *Physica B: Cond. Matter*. **212**, 429 (1995).
19. V. N. Brudnyi and S. N. Grinyayev, *Semiconductors* **35**, 784 (2001).