

機関番号：17701

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2013

課題番号：23656083

研究課題名(和文) ひずみ負荷による半導体デバイスの電気特性変動についてのナノメカニクスの検討

研究課題名(英文) Nano-mechanical investigation of the effects of mechanical strain on semiconductor devices

研究代表者

池田 徹 (Ikeda, Toru)

鹿児島大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40243894

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円、(間接経費) 930,000円

研究成果の概要(和文)：応力を受けるSiの電気特性変動について、バルクシリコンの移動度特性はよく表されているものの、nMOSFETについては実験結果から得られる移動度変化との乖離が残った。この応力によるnMOSFETの移動度の変化についての理論値と実験値の乖離について、真性キャリア濃度の変化と電子がnMOSFETのチャネル化の非常に薄い層に偏在することによる、二次元量子化の影響について検討を行った。その結果、ひずみによる真性キャリア濃度変化の電気特性変動に対する寄与は比較的小さいことが分かった。また、反転層における表面量子化の考慮も十分に現象を表現するには至らなかった。

研究成果の概要(英文)：This study discusses a numerical model for analyzing the effects of mechanical stress on semiconductor devices. In other words, drift-diffusion device simulation is conducted using a physical model incorporating the effects of mechanical stress. Then, each impact of the stress-induced physical phenomena is analyzed. In our previous study, three physical phenomena that were attributed to mechanical stress have been modeled in our electron mobility model, i.e., the changes in relative population, the momentum relaxation time and the effective mass of electrons in conduction-band valleys. In this study, the stress-induced change of intrinsic carrier density is modeled. Stress-induced variations of drain current characteristics on nMOSFETs are evaluated using a drift-diffusion device simulator including above mentioned physical models. It is demonstrated that the impact of stress-induced change of intrinsic carrier density is small for our evaluated nMOSFETs.

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：機械材料・材料力学

キーワード：材料設計 プロセス 物性 評価 ひずみ効果 半導体

1. 研究開始当初の背景

電子デバイスは機械的な破損にいたらないまでも、負荷ひずみによってその電気特性が変動し、所定の特性が得られないことがあり、大きな問題となっている。そこで、申請者らは、樹脂封止された際にシリコンチップ表面に発生するひずみを評価し、そのひずみによって生じる特性変動をデバイスシミュレーションによって予測する研究を行ってきた。半導体の電気特性予測手法としては、ドリフト拡散モデル(図1参照)とモンテカルロ法を用いたデバイスシミュレーション技術が一般に用いられている。ここでひずみの効果は、電子と正孔の移動度の変化に帰着される。申請者らのこれまでの研究では、電子がキャリアとなるn形半導体に注目し、統計力学による結果から導かれたキャリアの存在確率、キャリアの散乱確率、キャリアの有効質量のひずみによる変化モデル(図2参照)を利用して、電子移動度の変化量を予測し、これをデバイスシミュレーションに適用することで、nMOSFETのひずみによる電気特性変動を予測した。

デバイスシミュレーションでは、以下の3つの連立方程式を自己無撞着的に解くことによってデバイスの電気特性を算出する。

- 電流連続方程式 (結晶内のキャリア数保存)
 
$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} - \frac{1}{q} \frac{\partial p_x}{\partial t} - \text{div}(\frac{J_x}{q}) = G - R = U \\ \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{1}{q} \frac{\partial p_x}{\partial t} + \text{div}(\frac{J_x}{q}) = G - R = U \end{cases}$$
- ポアソン方程式 (結晶内の電界)
 
$$\nabla^2 \psi = -\frac{q}{\epsilon} (N_D - N_A + p - n)$$
- 電流密度方程式 (ドリフトと拡散による電流)
 
$$\begin{cases} J_n = q \mu_n E_x + q D_n \nabla n \\ J_p = q \mu_p E_x - q D_p \nabla p \end{cases}$$

↑ 電気素量      運動量緩和時間

$\mu = \frac{e\tau}{m^*}$  ← 有効質量

(n: 電子濃度, p: 正孔濃度, 添字n: 電子を表す, 添字p: 正孔を表す)

応力効果はキャリア移動度 $\mu$ に反映される。

図1 ドリフト拡散モデル

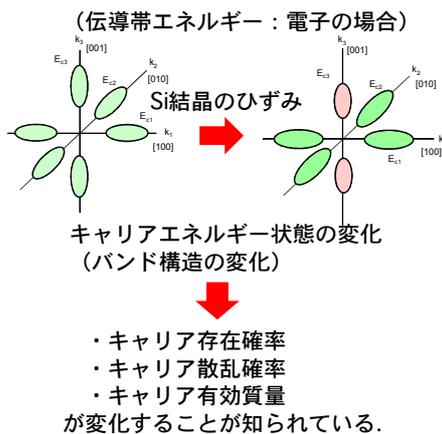


図2 伝導帯エネルギーの変化

2. 研究の目的

これまで、半導体デバイスにおける応力効果の物理現象として、電子の相対密度<sup>[1]</sup>、散乱確率<sup>[2]</sup>および有効質量<sup>[3]</sup>の変化をデバイス

シミュレーションにおいて考慮した。本研究では、さらなるシミュレーション精度向上のため、応力による真性キャリア濃度変化、および反転層における表面量子化の効果を考慮した電子移動度モデルを物理モデルに組み込み、デバイスシミュレーションを実施した。シミュレーション結果と実験結果との比較により、本シミュレーション手法の妥当性について検討した。

3. 研究の方法

(1) 応力依存電子移動度モデルおよび応力依存真性キャリア濃度モデル

本研究では、これまで我々が応力依存移動度モデルで考慮していた電子相対密度変化、電子散乱確率変化、電子有効質量変化に加え、反転層における電子相対密度変化<sup>[4]</sup>および無応力状態での電子散乱確率<sup>[5]</sup>のバレー間の差を考慮した。反転層における電子相対密度変化を与える式を以下に示す。

$$I_i = \frac{\exp\{-(E_0^{(i)} + \Delta E_c^{(i)}(\epsilon))/k_B T\}}{\sqrt{1 - s^2 \epsilon_{kl}^2}}$$

$$p_i = \frac{I_i}{\sum_{i=1}^3 I_i} \tag{1}$$

また、式(2)により新たに応力に起因した真性キャリア濃度変化<sup>[1]</sup>を考慮した。

$$f_{ni} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \exp\left(-\frac{\Delta E_c^{(i)}}{k_B T}\right) \sum_{j=1}^2 \frac{m_j^{3/2}}{m_1^{3/2} + m_2^{3/2}} \exp\left(\frac{\Delta E_v^{(j)}}{k_B T}\right)} \tag{2}$$

(2) 1軸応力負荷下におけるnMOSFETの電気特性変動評価デバイスシミュレーション

図3に示すゲート長さ0.8 $\mu\text{m}$ のnMOSFETを対象とし、チップ面内2軸等方応力-77MPaをデバイス内部に一樣に負荷した場合について、(1)に示した電子移動度モデルおよび真性キャリア濃度モデルを用い、応力効果をシミュレーションした。その際、デバイス基板内の反転層領域およびそれ以外のバルク領域には、それぞれ反転層およびバルクの電子移動度モデルを用いた。用いた解析パラメータを表1に示す。

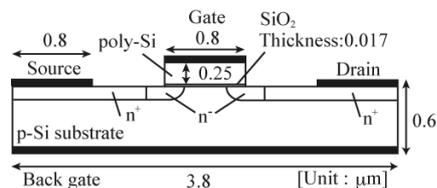


図3 nMOSFETの概念図

ソース・ドレイン間の印加電圧を 0.1V, ゲート電圧を 0~5V まで変化させ, ドレイン電流をシミュレーションした.

表 1 反転層の移動度モデルに用いたパラメータ

	$F$	$\Delta\Lambda$ [ $\times 10^{-20} \text{m}^2$ ]	$\beta_n$ correction	$C_{qm}$ [ $\times 10^{-5} \text{eV}^{1/3} \text{cm}^{2/3}$ ]
(a)	$F_s$	25	×	1.695
(b)				
(c)				
(d)				
(e)				
(f)	$E_{eff}$	125	○	0.9
(g)				
(h)				
		30		0.1

#### 4. 研究成果

##### (1) 解析結果

シミュレーション結果のドレイン電流から得られた相互コンダクタンス ( $G_m$ ) の無応力状態からの変動率を実験結果<sup>[6]</sup>とともに図 4 に示す. バルクの電子移動度モデルのみ用いた結果(Mobility (Bulk))に比べ, 真性キャリア濃度モデルも考慮した結果(Mobility (Bulk)+Density)は実験結果に近づいた. 一方, 表面量子化の効果を考慮した反転層の電子移動度を用いると乖離した(a). そこで, 反転層の電子移動度モデル内の未確定のパラメータを以下のように変更した解析を行った. まず, 反転層内の閉じ込め電界  $F$  の値を, 反転層内での値  $E_{eff}$  からシリコン界面の値  $F_s$  に変更したところ実験結果との差は増加した(b). 一方, 表面粗さ散乱のパラメータ  $\Delta\Lambda$  を変更しても結果にほぼ影響しなかった(c~e). 同様に, フォノン散乱のパラメータ  $\beta_n$  の補正項を無視又は考慮しても解析結果はほぼ変わらなかった(f). 最後に, 基底サブバンドエネルギーのパラメータ  $C_{qm}$  を変化させると, 図 5 にも示すように  $G_m$  変動率は極小値を持ち, そこで実験結果との乖離が最小になった.  $C_{qm}$  の変化が閉じ込め電界の変化に対応すること, および  $F$  を  $E_{eff}$  または  $F_s$  とするかで  $G_m$  変動率が大きく変化したことを考慮すると, 今後, シミュレーション精度を向上させるには, 閉じ込め電界  $F$  を正しく求める必要があると考えられる.

##### (2) 結言

本研究では, 応力効果を考慮したデバイスシミュレーション手法により, チップ面内 2

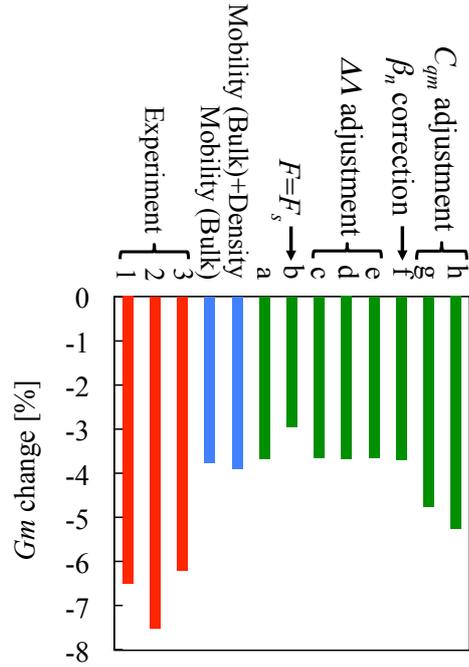


図 4  $\Delta G_m/G_m$  の計算結果

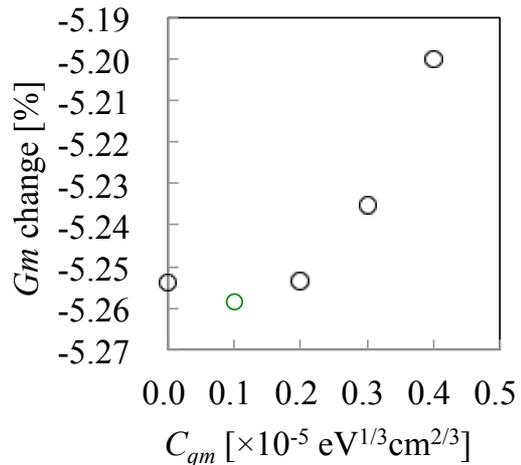


図 5  $\Delta G_m/G_m$  の  $C_{qm}$  依存性.

軸等方応力下での nMOSFET の電気特性変動をシミュレーションし, 実験結果と比較することにより, 本シミュレーション手法, 特にその中の物理モデルである電子移動度モデルおよび真性キャリア濃度モデルの妥当性について検討した. 真性キャリア濃度変化の考慮は定量的に解析結果にほとんど影響ないことが分かった. また, 表面量子化の効果を考慮した結果から, 閉じ込め電界の値を適切に取る必要性が示唆された. 今後, 表面量子化による有効質量の変化の検討が必要と考えられる.

#### 参考文献

[1] J. L. Egly *et al.*, Solid-State Electronics, Vol.

36, (1993).

[2] S. Dhar *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 52, (2005).

[3] E. Ungersboeck *et al.*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 54, (2007).

[4] H. Takashino *et al.*, IEEE Trans. Electron Devices, Vol.55, (2008).

[5] K. Masaki *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.28, (1989).

[6] 小金丸正明他, 電子情報通信学会論文誌 (C), Vol. J91- C, (2008).

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① 岡大智, 池田徹, 宮崎則幸, 田中宏之, 畑尾卓也, 松本圭司, 小原さゆり, 折井靖光, 山田文明, 嘉田守宏, SEM-DICM による3次元積層チップの熱ひずみ計測に基づく非線形有限要素解析精度の評価・改善, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J96-C, No.11, 2013, pp. 352-360. (査読有り)
- ② 松田和敏, 池田徹, 小金丸正明, 宮崎則幸, 樹脂封止された積層半導体チップの残留応力に起因する電気特性変動評価手法, 日本機械学会論文集 (A編), 第79巻, 第797号, 2013, pp. 74-88. (査読有り)
- ③ 小金丸正明, 多田直弘, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, ドリフト拡散デバイスシミュレーションを用いた1軸負荷に起因するnMOSFETの電気特性変動評価手法, エレクトロニクス実装学会誌, 第15巻, 第6号, 2012, pp.483-491. (査読有り)
- ④ 池田徹, 機械学会における電子実装の信頼性と熱制御に関する研究分科会活動について, エレクトロニクス実装学会誌, 第15巻第5号, 2012, pp.323-326. (査読有り)
- ⑤ Toru Ikeda, Toshifumi Kanno, Nobuyuki Shishido, Noriyuki Miyazaki, Hiroyuki Tanaka and Takuya Hatao, Strain Measurement in Micro-electronic Packages Using Digital Image Correlation Method, Welding International, Vol. 25, No. 11, 2011, pp.844-850. (査読有り)
- ⑥ Masaaki Koganemaru, Keisuke Yoshida, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki and Hajime Tomokage, Device Simulation for Evaluating Effects of Inplane Biaxial Mechanical Stress on n-Type Silicon Semiconductor, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol.58, No.8, 2011, pp.2525-2536. (査読有り)

[学会発表] (計 26 件)

- ① Masaaki Koganemaru, Naohiro Tada,

Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki, Device simulation for effects of mechanical stress on electrical performances of NMOSFETs: The impacts of stress-induced change of intrinsic carrier density, The ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (InterPACK 2013), 16-18 July 2013 (Burlingame, CA, USA), in CD, IPACK2013-73248.

- ② Toru Ikeda, Masatoshi Oka and Noriyuki Miyazaki, Reliability evaluation of a 3D SIC package by the combination of the SEM-DIC and the FEM, The ASME 2013 International Technical Conference and Exhibition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Microsystems (InterPACK 2013), 16-18 July 2013 (Burlingame, CA, USA), in CD, IPACK2013-73126.
- ③ Toru Ikeda, Masatoshi Oka, Noriyuki Miyazaki, Keiji Matsumoto, Sayuri Kohara, Yasumitsu Orii, Fumiaki Yamada and Morihiko Kada, Nonlinear FEA for a 3D SIC package improved by the digital image correlation with SEM, International Conference on Electronics Packaging in Osaka, ICEP2013 Proceedings, 10-12 April 2013, pp. 22-25.
- ④ Toru Ikeda, Masatoshi Oka, Noriyuki Miyazaki, Hiroyuki Tanaka, Takuya Hatao, Reliability Evaluation of a New 3D SIC Package by FEM and Thermal-Strain Measurement with Digital Image Correlation Using SEM, The 14<sup>th</sup> International Conference on Electronic Materials and Packaging (EMAP 2012), 15 December 2012 (Hong Kong).
- ⑤ 池田徹, デジタル画像相関法を用いたひずみ計測による微細電子実装部の非線形有限要素法の精度改善, Marc Users Meeting 2012 in Fukuoka, 2012年11月22日(福岡) ---招待講演
- ⑥ Naohiro Tada, Masaaki Koganemaru, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki and Hajime Tomokage, Numerical Evaluation of Correlation between Stress Concentration and Electronic Characteristics on nMOSFETs, International Computational Mechanics Symposium 2012 (ICMS2012), 11 October 2012 (Kobe Japan).
- ⑦ Masatoshi Oka, Shinya Kawahara, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki, Hiroyuki Tanaka and Takuya Hatao, Improvement of the Accuracy of Nonlinear Finite Element Analysis for a 3D SIC Package Using SEM and DICM, International Computational

- Mechanics Symposium 2012 (ICMS2012), 11 October 2012 (Kobe Japan).
- ⑧ 小金丸正明, 多田直弘, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, nMOSFET 内部の応力分布と電気特性との相関に関するデバイスシミュレーション, 日本機械学会第25回計算力学講演会講演論文集, pp. 134-135, 2012年10月6日 (神戸市).
- ⑨ 池田徹, 岡大智, 宮崎則幸, 田中宏之, 畑尾卓也, SEM-DICM を用いた3D-SIC 模擬チップのひずみ計測と有限要素解析精度の向上, 日本機械学会第25回計算力学講演会講演論文集, pp. 127-128, 2012年10月6日 (神戸市).
- ⑩ 岡大智, 池田徹, 宮崎則幸, 松本圭司, 小原さゆり, 折井靖光, 山田文明, 嘉田守弘, SEMを用いたデジタル画像相関法による熱ひずみ計測を用いた三次元積層チップの非線形有限要素解析精度評価, 日本機械学会M&M2012材料力学カンファレンス, 2012年9月24日 (松山市).
- ⑪ Masaaki Koganemaru, Naohiro Tada, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki and Hajime Tomokage Numerical Study on Impact of Mechanical Stress in the Regions of High Current Density in n-type MOS Devices, 4<sup>th</sup> Electronics System Integration technologies Conference (ESTC 2012), 19 September 2012 (Amsterdam, The Netherlands).
- ⑫ 岡大智, 河原真哉, 池田徹, 宮崎則幸, 松本圭二, 小原さゆり, 折井靖光, 山田文明, 嘉田守弘, SEM とデジタル画像相関法によるひずみ計測を利用した三次元積層チップの非線形有限要素解析の精度向上, 第22回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES2012), 2012年9月13日 (堺市).
- ⑬ 多田直弘, 小金丸正明, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, デバイス内部の応力集中と真性キャリア濃度変化を考慮したnMOSFET の電気特性変動でバイスシミュレーション, 第22回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES2012), 2012年9月13日 (堺市).
- ⑭ Noriyuki Miyazaki, Toru Ikeda and Masatoshi Oka, Improvement of Nonlinear Finite Element Analyses of Electronic Packaging Using the Strain Measurement with the Digital Image Correlation, 10th World Congress on Computational Mechanics, 12 July 2012 (Sao Paulo, Brazil).
- ⑮ Masaaki Koganemaru, Naohiro Tada, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki and Hajime Tomokage, Device Simulation of Stress Effect on Electrical Performances of Semiconductor Devices : Impact of Mechanical Stress in the Region of High Current Density in the Devices, 10th World Congress on Computational Mechanics, 12 July 2012 (Sao Paulo, Brazil).
- ⑯ Toru Ikeda, Masatoshi Oka, Shinya Kawahara, Noriyuki Miyazaki, Keiji Matsumoto, Sayuri Kohara, Yasumitsu Orii, Famada Yamada and Morihiko Kada and M. Kada, Combination between the Nonlinear Finite Element Analyses and the Strain Measurement Using the Digital Image Correlation for a New 3D SIC Package, IEEE International 3D System Integration Conference (IEEE 3DIC 2011), 1 February 2012 (Osaka, Japan).
- ⑰ 岡大智, 池田徹, 宮崎則幸, デジタル画像相関法によるひずみ計測を用いた三次元積層チップの微細接合部のひずみ評価, 第18回エレクトロニクスにおけるマイクロ接合・実装技術シンポジウム (Mate 2012), 2012年1月31日 (横浜市).
- ⑱ Masaaki Koganemaru, Naohiro Tada, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki and Hajime Tomokage, Numerical Study on Impact of Uniaxial Stress on n-type Silicon MOS Devices, The13th International Conference on Electronics Materials and Packaging (EMAP2011), 14 December, 2011 (Kyoto Japan).
- ⑲ Masatoshi Oka, Shinya Kawahara, Toru Ikeda and Noriyuki Miyazaki, Improvement of the Accuracy of the Nonlinear Finite Element Analyses for a New 3D SIC Package Using the Thermal Strain Measurement with the Digital Image Correlation, The13th International Conference on Electronics Materials and Packaging (EMAP2011), 14 December 2011 (Kyoto Japan).
- ⑳ Toru Ikeda, Shinya Kawahara, Masatoshi Oka, Noriyuki Miyazaki, Improvement of the Nonlinear Finite Element Analyses for a 3D SIC using the Strain Measurement by the Digital Image Correlation, International Conference on Materials and Reliability 2011 (ICMR2011), A199, 22 November 2011, (Busan, Korea).
- ㉑ 岡大智, 河原真哉, 池田徹, 宮崎則幸 デジタル画像相関法による次世代三次元積層チップ断面のひずみ計測を用いた非線形有限要素法解析精度の向上, 日本機械学会第24回計算力学講演会, 2011年10月8日 (岡山市).
- ㉒ 多田直弘, 小金丸正明, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, デバイスシミュレーションによる nMOSFET への一軸応力負荷の影響評価, 日本機械学会第24回計算力学講演会, 2011年10月8日 (岡山市).
- ㉓ Masaaki Koganemaru, Keisuke Yoshida, Naohiro Tada, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki and Hajime Tomokage, Evaluation

of Uniaxial-Stress Effects on DC Characteristics of n-type Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistors, International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics (ATEM'11), 21 September 2011 (Kobe, Japan)

- ②④ 小金丸正明, 多田直弘, 池田徹, 宮崎則幸, 友景肇, nMOSFETにおける1軸応力の影響評価, 第21回マイクロエレクトロニクスシンポジウム (MES2011), 2011年9月8日 (吹田市).
- ②⑤ 岡大智, 河原真哉, 池田徹, 宮崎則幸デジタル画像関連法による熱ひずみ計測を用いた次世代三次元積層チップの非線形有限要素解析精度の改善, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 2011年7月16日 (北九州市).
- ②⑥ Masaaki Koganemaru, Keisuke Yoshida, Naohiro Tada, Toru Ikeda, Noriyuki Miyazaki and Hajime Tomokage, The ASME 2011 Pacific Rim Technical Conference & Exposition on Packaging and Integration of Electronic and Photonic Systems, MEMS and NEMS (InterPACK 2011), 6 July 2011 (Portland, USA).

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

池田 徹 (IKEDA, Toru)  
鹿児島大学・理工学研究科・教授  
研究者番号: 40243894

### (3)連携研究者

小金丸 正明 (KOGANEMARU, Masaaki)  
福岡県産業・科学技術振興財団  
研究者番号: 20416506