

具有新型缓冲层的 IGBT 特性研究

黄仁发, 胡冬青, 吴 郁, 贾云鹏, 邹世凯, 安鹏振, 彭 领
(北京工业大学 信息学部, 北京 100124)

摘 要: 为了降低低压场终止型 IGBT 的工艺难度并改善其关断特性, 对注氢场终止型 IGBT (PFS-IGBT) 的缓冲层进行了研究, 引入了传统场终止型 IGBT (FS-IGBT) 和线性缓变掺杂场终止型 IGBT (LFS-IGBT) 来与 PFS-IGBT 作对比。PFS-IGBT 的缓冲层通过多次注氢形成, 从背面到内部的掺杂浓度依次降低, 具有多个浓度峰值, 厚度为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 。FS-IGBT 的缓冲层掺杂浓度较高, 厚度为 $5 \mu\text{m}$ 。LFS-IGBT 的缓冲层从背面到内部的掺杂浓度呈线性降低, 其厚度为 $20 \sim 30 \mu\text{m}$ 。采用 Sentaurus TCAD 对三种具有不同缓冲层结构的 IGBT ($600 \text{ V}/40 \text{ A}$) 的特性进行了分析。结果表明, PFS-IGBT 通过控制注氢次数、剂量和能量可以获得最优的掺杂分布, 器件性能与 LFS-IGBT 相当, 比 FS-IGBT 拥有更平缓的电流关断波形和更强的短路坚固性。

关键词: 绝缘栅双极型晶体管; 注氢; 场终止; 开关特性; 短路坚固性

中图分类号: TN322⁺.8

文献标识码: A

文章编号: 1004-3365(2017)06-0851-05

Study on Characteristics of an IGBT with a New Buffer Layer

HUANG Renfa, HU Dongqing, WU Yu, JIA Yunpeng, ZOU Shikai, AN Pengzhen, PENG Ling

(Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, P. R. China)

Abstract: In order to reduce the difficulty of ultrathin wafer process and improve the switching behavior of low voltage rated field stop IGBT (FS-IGBT), the buffer layer of proton implanted IGBT (PFS-IGBT) was proposed and studied emphatically. Another two kinds of layers were introduced to compare the characteristics. The buffer layer of PFS-IGBT had a thickness of 20 to 30 μm , formed by multiple injections of proton. It had a plurality of concentration peaks that decreased successively from the back to the inside of the chip. FS-IGBT had a buffer layer with a thickness less than 5 μm and a relatively high doping concentration. Linear-doping field stop IGBT (LFS-IGBT) had a 20-30 μm buffer layer with a linear concentration variation from the back to the inside of the chip. Based on 600 V/40 A trench IGBTs, characteristics of the IGBTs were analyzed. The results showed that PFS-IGBT could achieve an optimal doping file through adjusting the dose, energy and implantation number. It had more smoothly switched current waveforms and stronger short circuit robustness compared with the FS-IGBT.

Key words: IGBT; Proton implantation; Field stop; Switching characteristics; Short circuit robustness

0 引 言

随着电力电子技术的发展, 绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 因具有通态压降低、开关速度高和驱动电路易集成等特点, 在逆变器和大功率电气系统的应用中独具优势。自 2000 年场终止型 IGBT 提出以来,

IGBT 的制造工艺获得很大进步, 导通损耗得到了进一步的降低^[1]。场终止型 IGBT 的缓冲层既有掺杂浓度较高的薄层类型, 也有掺杂浓度较低的厚层类型^[2]。薄的场终止层 ($5 \mu\text{m}$ 以下) 是正面结构形成后将硅片减薄到所需的厚度, 进行背面离子注入后退火形成。较大厚度的场终止层 ($20 \sim 30 \mu\text{m}$) 是正面结构形成之前硅衬底片通过高温预扩散形成,

收稿日期: 2016-12-16; 定稿日期: 2017-01-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61176071)

作者简介: 黄仁发 (1991—), 男 (汉族), 江西赣州人, 硕士, 研究方向为功率半导体器件和功率集成电路。

这种厚缓冲层可获得良好的关断特性和稳定的反向阻断能力^[3]。但是,通过高温预扩散形成缓冲层对于 1 700 V 耐压的 IGBT 是不实际的,原因是为了在高温扩散时不发生翘曲和碎片,150 mm 硅片需要约 500 μm 的厚度来维持它的机械强度^[4],1 700 V 耐压的 N 型基区厚度约为 150 μm ,需要从硅片背面扩散 350 μm 的深度,以形成缓冲层。对于 1 700 V 耐压的 IGBT,扩散深度更深,而长时间的高温扩散对于实际工艺来说是不可接受的。

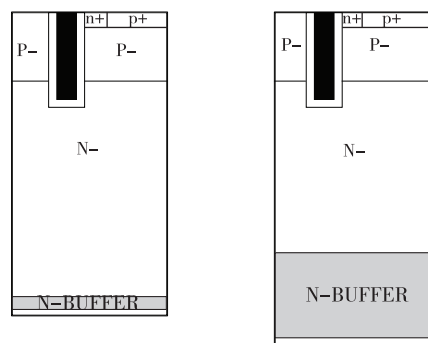
文献[4]提出可以用注氢工艺来形成快恢复二极管的厚缓冲层,这对于工艺来说是很大的改进。经过 SRIM2013 模拟,相同能量下,氢在硅材料中具有比其他杂质更大的注入深度。例如,在 2 MeV 能量下,氢可以达到 48 μm 的注入深度,而磷只能达到 2 μm 的注入深度。注氢工艺的另一个优势在于退火温度比较低,能在 500 $^{\circ}\text{C}$ 以下进行退火,从而不会对已形成的正面结构产生影响^[5]。这些优势使得氢非常适合用来实现功率器件的深注入,包括形成 IGBT 的深缓冲层。

为了获得与高温扩散类似的缓变掺杂,可以通过多次不同能量和剂量的注氢来形成从背面到内部依次降低的多个浓度峰值,获得缓变掺杂的模拟近似。为研究注氢形成的缓冲层对器件性能的影响,基于 600 V 的槽栅 IGBT,本文对比了三种缓冲层结构:注氢场终止型 IGBT(PFS-IGBT)、传统场终止型 IGBT(FS-IGBT)、线性缓变掺杂场终止型 IGBT(LFS-IGBT)。采用 Sentaurus TCAD 工具对三种 IGBT 的静态和动态特性进行了对比分析。

1 器件参数选择

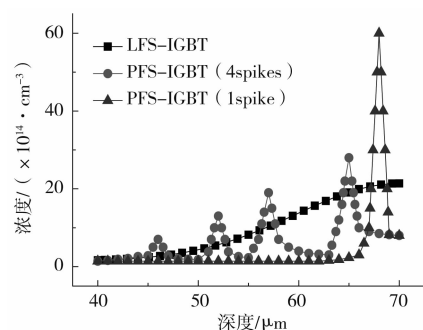
三种 IGBT 的半元胞结构示意图如图 1 所示。三者的正面结构均一致。半元胞宽为 8 μm ,槽宽为 2 μm ,dummy 的一半宽度为 2 μm ,台面的一半宽度为 4 μm ,台面的槽深度为 5 μm ,n 型漂移区的浓度均为 $1.4 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$,背面 P 型区采用透明发射极结构,厚度为 0.4 μm 。FS-IGBT 结构的示意图如图 1(a)所示,总厚度为 57 μm ,缓冲层厚度和浓度分别为 3 μm 和 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 。PFS-IGBT 和 LFS-IGBT 两种结构的示意图如图 1(b)所示,总厚度均为 70 μm 。LFS-IGBT 的缓冲层是厚度为 30 μm 、峰值浓度为 $2 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ 的缓变掺杂。PFS-IGBT 设置四种注入形式,分别为一次、二次、三次、四次注入。为了在正向阻断时获得稳定的电场终止,随着注入次

数增多,缓冲层厚度增大,浓度减小。这两种结构的缓冲层的掺杂分布曲线如图 2 所示。

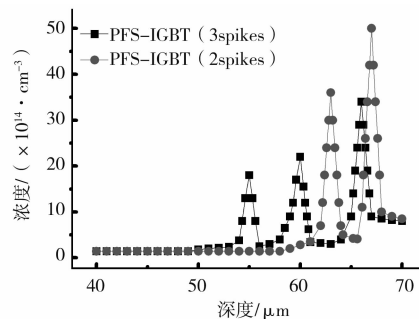


(a) FS-IGBT (b) PFS-IGBT, LFS-IGBT

图 1 三种 IGBT 的半元胞结构示意图



(a) LFS-IGBT 和一次、四次注入 PFS-IGBT



(b) 二次、三次注入 PFS-IGBT

图 2 LFS-IGBT 和 PFS-IGBT 的缓冲层掺杂分布

2 仿真结果分析

2.1 静态特性

对于 IGBT 的击穿特性,考虑到结终端的降额效应和实际工艺与仿真之间的误差,在仿真设计时留出了余量。三种结构的击穿电压都为 750 V,FS-IGBT 的缓冲层厚度小、掺杂浓度较高,能使电场稳定终止。相反,LFS-IGBT 和 PFS-IGBT 的缓冲层厚度更大、掺杂浓度较低,在相同的击穿电压下,这两种结构的缓冲层总厚度比 FS-IGBT 结构有所增加。

对于 IGBT 的导通特性,设置相同的背面 P 型

区浓度($3.4 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$),在导通电流为 40 A,即电流密度为 $267 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的条件下,FS-IGBT 的导通压降为 1.9 V,LFS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT 的导通电压分别为 1.68 V 和 1.7 V。由此可知,FS-IGBT 即便有更薄的器件厚度,也要有较高的缓冲层浓度 $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 来获得较好的电场终止。因此,FS-IGBT 缓冲层的浓度比 LFS-IGBT 和四次 PFS-IGBT 缓冲层的峰值浓度更高,使得注入效率低于后两者,从而使得导通电压更高。

2.2 开关特性

IGBT 器件常用于控制输送到感性负载的功率,其开关特性仿真使用的感性负载电路如图 3 所示。设定合理的电感值,三种结构在电流达到 40 A 时,IGBT 开始关断,偏置电压为 400 V,初始温度为 300 K。IGBT 关断过程中集电极电流曲线如图 4 所示。

可以看出,LFS-IGBT 具有平缓的电流关断曲线,FS-IGBT 在关断时出现较大的振荡,这对于实际运用时是非常不利的。PFS-IGBT 的电流关断曲线随着注氢次数增多而变得更平缓,在只有一次注氢下,因为要获得预期的击穿电压,注氢形成的缓冲层浓度比多次注入的更大,厚度也更小,其缓冲层特征逐渐偏向类似于 FS-IGBT 缓冲层,具有较薄且浓度较大的特点;其关断电流也与 FS-IGBT 一样,出现较大振荡,随着注入次数的增加,关断电流逐渐趋向于平滑。

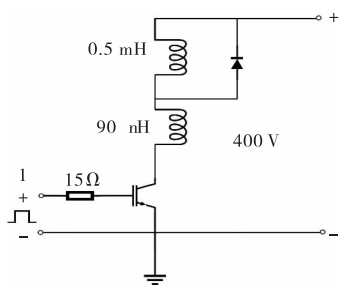
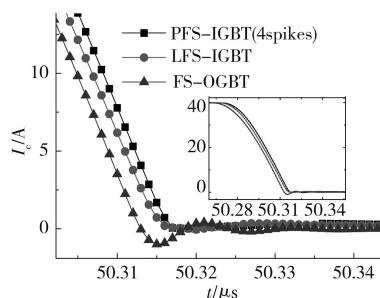
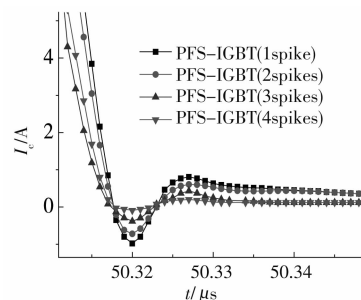


图3 用于开关特性仿真的感性负载电路



(a) LFS-IGBT,FS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT



(b) 不同注入次数的 PFS-IGBT

图4 关断过程中集电极电流曲线

关断电流曲线出现振荡的原因如下。FS-IGBT 和一次注入 PFS-IGBT 的基区厚度比 LFS-IGBT 和多次注入 PFS-IGBT 的小,在相同导通电压下,基区内存储的载流子数量更少,使得关断时电压的变化更大。另外,FS-IGBT 和一次注入 PFS-IGBT 的 n 型缓冲层较高的掺杂浓度会导致该区域内的载流子寿命更短,关断时集电极电流的减少更快,从而使关断电流波形出现很大的振荡,甚至部分波形出现负值。缓冲层有更大的厚度和更低的掺杂浓度,使得 LFS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT 的关断电流波形变得更平滑。通过调整注入的次数、剂量、能量,获得最优的缓冲层掺杂分布。PFS-IGBT 的关断电流曲线与 LFS-IGBT 最接近,表明用注氢缓冲层代替缓变掺杂缓冲层在关断特性上也可获得良好的结果。

2.3 短路特性

相比于开关特性的仿真电路,IGBT 短路特性的仿真电路减少了续流二极管和负载电感。寄生电感设为 50 nH,温度为 400 K。不同寄生电感下 FS-IGBT 的短路电流曲线如图 5 所示。电感值会影响短路电流尖峰值和电流振荡幅度。电感值越大,电流尖峰值越大,电流振荡幅度越大。在一定范围内,短路时间受电感影响非常小。考虑到实际应用,电感值设为 50 nH。

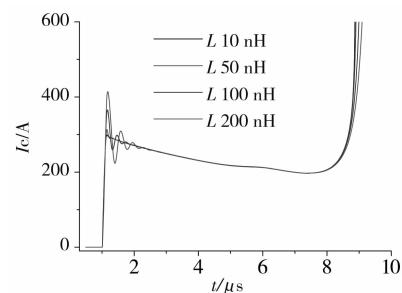


图5 不同寄生电感下 FS-IGBT 的短路电流曲线

短路坚固性是 IGBT 在电机驱动应用上的一个重要需求^[6]。短路特性方面,图 6 所示为三种结构

寄生电感为 50 nH、温度为 400 K 下的短路电流曲线。

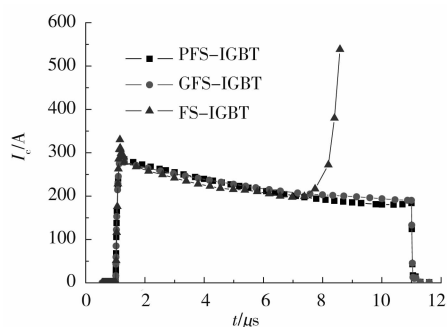


图 6 寄生电感为 50 nH 时三种 IGBT 的短路电流曲线

可以看出,FS-IGBT 的短路承受时间为 7 μs ,短路电流 I_{sc} 为 330 A,而 LFS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT 的短路承受时间均达到了 10 μs , I_{sc} 分别为 287 A 和 281 A。短路脉冲期间,短路损耗 E_{sc} 大于临界烧毁能量 E_{crit} 时,IGBT 的温度超过大量载流子激发的临界值,阻断电压严重退化,导致电路烧毁^[7-8]。短路状态时,电流密度太大是 E_{sc} 过大的主要原因,因此控制短路电流密度是获得良好短路坚固性的重要因素。 I_{sc} 为^[9]:

$$I_{\text{sc}} = \mu_n \times \frac{W}{L} \times \frac{C_{\text{ox}}}{2} \times (V_g - V_{\text{th}})^2 \times \frac{1}{(1 - \alpha_{\text{pnp}})} \quad (1)$$

式中, μ_n 为沟道电子迁移率, W 和 L 分别为沟道的宽度和长度, C_{ox} 为栅氧电容, V_g 为栅极所加电压, V_{th} 为阈值电压, α_{pnp} 为共基极电流增益,是注入效率 γ_E 和输运系数 α_T 的乘积。由(1)式可知,在正面结构相同的情况下, I_{sc} 随 pnp 管的共基极电流增益 α_{pnp} 增大而增大。虽然 LFS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT 相比于 FS-IGBT 有更大的 γ_E ,但是在短路时未耗尽的宽度更大,所以,LFS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT 有更小的 α_T ^[10]。三种结构短路状态时的电场分布曲线如图 7 所示。

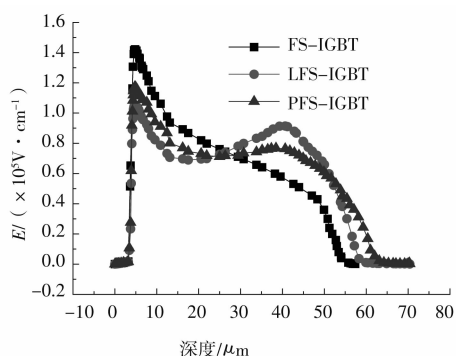


图 7 三种结构在短路状态的电场分布曲线

可以看出,在 400 V 的偏压下,FS-IGBT 耗尽层穿通到了缓冲层,未耗尽的缓冲层宽度小于 2 μm ,而 LFS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT 的未耗尽层宽度分别为 8 μm 和 10 μm ,使得 α_T 成为影响 α_{pnp} 的主要因素。LFS-IGBT 和四次注入 PFS-IGBT 的 α_{pnp} 比 FS-IGBT 更小,使得它们的短路电流也小于 FS-IGBT,因而能获得比 FS-IGBT 更长的短路时间,表现出更强的短路坚固性。

2.4 折中特性

在保证电路高可靠性情况下,相互矛盾的通态压降和关断损耗能达到很好的折中是决定电路性能的关键因素。通过调整背面 P 型区浓度得到不同的导通压降 $V_{\text{ce-on}}$,再计算各个导通压降下的关断损耗 E_{off} ,就可以得到折中曲线。三种结构的折中曲线图如图 8 所示。

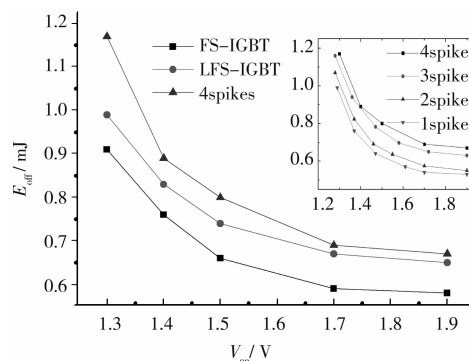


图 8 三种结构的折中曲线

可以看出,在相同导通压降下,随着注入次数的减少,PFS-IGBT 的关断损耗降低,折中曲线向 FS-IGBT 靠近,并且一次注入时折中曲线略好于 FS-IGBT。相比于 FS-IGBT,LFS-IGBT 和三次、四次注入 PFS-IGBT 的折中曲线要差一些。原因在于,缓冲层浓度随注入次数增多而降低,缓存层厚度随着注入次数的增多而增大,导致 LFS-IGBT 和三次、四次注入 PFS-IGBT 相比于 FS-IGBT 有更低的缓冲层浓度和更大的缓冲层厚度,使得在相同导通压降下基区的载流子寿命更长,数量更多,从而使得关断时载流子抽取更慢,器件有更大的关断损耗,折中曲线变差。

3 结 论

注氢工艺因为具备低能量下注入深度大和退火温度低的优势,很适合用于代替高温预扩散工艺来形成 IGBT 的深注入。仿真结果表明,可通过调整注入的次数、剂量、能量来获得最优的缓冲层掺杂分

布,使得 PFS-IGBT 在性能上与 LFS-IGBT 相当,在开关特性上,比 FS-IGBT 有更平缓的关断电流曲线,在短路特性上有更长的短路时间,表现出更强的短路坚固性。

参考文献:

- [1] LASKA T, MUNZER M, PFIRSCH F, et al. The field stop IGBT (FS IGBT)-a new power device concept with great improvement potential [C] // Proceed 12th Int Symp Power Semicond Dev & Integr Circ. Toulouse, France. 2000: 355-358.
 - [2] MATSUDAI T, TSUKUDA M, UMEKAWA S, et al. New anode design concept of 600 V thin wafer PT-IGBT with very low dose p-buffer and transparent p-emitter [C] // Proceed 12th Int Symp Power Semicond Dev & Integr Circ. Cambridge, UK. 2003: 75-78.
 - [3] VOBECKY J, RAHIMO M, KOPTA A, et al. Exploring the silicon design limits of thin wafer IGBT technology the controlled punch through (CPT) IGBT [C] // Proceed 12th Int Symp Power Semicond Dev & Integr Circ. Orlando, FL, USA. 2008: 76-79.
 - [4] KE M, DEVINY I, QIN R, et al. Process development and proton implanted n-type buffer optimization for 1700 V rated thin wafer fast recovery diodes [C] // 15th Europ Conf Power Elec & Applic. Lille, France. 2013: 1-7.
 - [5] KLUG J N, LUTZ J, MEIJER J B, et al. N-type doping of silicon by proton implantation [C] // 13th Europ Conf Power Elec & Applic. Barcelona, Spain. 2011: 1-7.
 - [6] LASKA T, MILLER G, PFAFFENLEHNER M, et al. Short circuit properties of trench-/field-stop-IGBTs-design aspects for a superior robustness [C] // Proceed 15th Int Symp Power Semicond Dev & Integr Circ. Cambridge, UK. 2003: 152-155.
 - [7] MILADY S, SILBER D, PFIRSCH F, et al. Simulation studies and modeling short circuit current oscillations in IGBTs [C] // Proceed 21th Int Symp Power Semicond Dev & Integr Circ. Barcelona, Spain. 2009: 37-40.
 - [8] KOPTA A, RAHIMO M, SCHLAPBACH U, et al. Limitation of the short-circuit ruggedness of high-voltage IGBTs [C] // Proceed 21th Int Symp Power Semicond Dev & Integr Circ. Barcelona, Spain. 2009: 33-36.
 - [9] LINDER S. Power semiconductors [M]. Boca Raton: CRC Press. 2006: 241.
 - [10] BALIGA J. Fundamentals of power semiconductor devices [M]. Berlin: Springer, 2008: 768.
-
- (上接第 850 页)
- [9] 左青云, 刘明, 龙世兵, 等. 阻变存储器及其集成技术研究进展 [J]. 微电子学, 2009, 39(4): 546-551.
 - [10] JIANG Z, YU S, WU Y, et al. Verilog-A compact model for oxide-based resistive random access memory (RRAM) [C] // IEEE SISPAD. Yokohama, Japan. 2014: 41-44.
 - [11] LIU S, WANG W, LI Q J, et al. Highly improved resistive switching performances of the self-doped Pt/HfO₂:Cu/Cu devices by atomic layer deposition [J]. Sci China Phys Mech & Astron, 2016, 59(12): 127311.
 - [12] 李颖戮, 刘明, 龙世兵, 等. 基于 I-V 特性的阻变存储器的阻变机制研究 [J]. 微纳电子技术, 2009, 46(3): 134-140.
 - [13] 王永, 管伟华, 龙世兵, 等. 阻变式存储器存储机理 [J]. 物理, 2008, 37(12): 870-874.
 - [14] 杨顺, 马驰远, 方粮. 忆阻器关键技术研究 [C] // 微处理器技术论坛. 贵阳, 中国. 2014: 55-62.
 - [15] 龙世兵, 刘琦, 吕杭炳, 等. 阻变存储器研究进展 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2016, 46(10): 107311.
 - [16] LI H, JIANG Z, HUANG P, et al. Variation-aware, reliability-emphasized design and optimization of RRAM using SPICE model [C] // IEEE DATE. Grenoble, France. 2015: 1425-1430.
 - [17] JIANG Z, WU Y, YU S, et al. A compact model for metal-oxide resistive random access memory with experiment verification [J]. IEEE Trans Elec Dev, 2016, 63(5): 1884-1892.
 - [18] 马文龙, 张锋, 杨红官, 等. 用于高密度 RRAM 单端式可编程灵敏放大器设计 [J]. 半导体技术, 2013, 38(10): 735-739.
 - [19] 吴雨欣, 李萌, 林殷茵. 一种提高阻变存储器擦除可靠性的写电路设计 [J]. 固体电子学研究进展, 2011, 31(5): 494-498.